

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Anamarija Kovačević

Zagreb, 2019.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentori:

Izv. prof. dr. sc. Željko Alar, dipl. ing.

Student:

Anamarija Kovačević

Zagreb, 2019.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se prof. dr. sc. Željku Alaru i asistentu Matiji Sakomanu, dipl. ing. na svoj pruženoj pomoći, znanju i savjetima tijekom pisanja i izrade ovog završnog rada.

Svom ocu Davoru, na materijalima za ispitivanje temi ovog rada i svim informacijama s kojima mi je pomogao u pisanju te majci Mariji i bratu Marku na podršci i razumijevanju za manjak vremena koji sam provodila s njima.

Svim prijateljima koji su mi pomogli s traženjem literature, savjetima, smijehom i kao mentalna podrška kada sam to najviše trebala.

Bez vas, pisanje ovog rada nebi prošlo ovako bezbrižno, i na tome vam hvala.

Anamarija Kovačević



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Anamarija Kovačević** Mat. br.: **0035200213**

Naslov rada na hrvatskom jeziku: Utjecaj eksploatacijskih uvjeta u bušotinama nafte na svojstva materijala tubinga

Naslov rada na engleskom jeziku: Influence of exploitation conditions in oil drillholes on tubing material properties

Opis zadatka:

Eksploatacijski uvjeti u bušotinama nafte se znatno razlikuju od okolišnih uvjeta na zemlji pa su i zahtjevi na materijale, koji se koriste za dijelove postrojenja u bušotinama, znatno zahtjevniji.

U radu je potrebno:


- opisati metode crpljenja nafte te okolišne uvjete u bušotinama
- dati pregled i povijesni razvoj materijala za tubinge i njihova osnovna svojstva
- prema literaturnim izvorima dati pregled najčešćih oštećenja tubinga
- eksperimentalno provesti ispitivanja svojstava materijala jednog novog i jednog upotrebljavanog tubinga
- analizirati dobivene rezultate i dati zaključke.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:

29. studenog 2018.

Zadatak zadao:


Izv.prof. dr. sc. Željko Alar

Rok predaje rada:

1. rok: 22. veljače 2019.

2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2019.

3. rok: 20. rujna 2019.


Predviđeni datumi obrane:

1. rok: 25.2. - 1.3. 2019.

2. rok (izvanredni): 2.7. 2019.

3. rok: 23.9. - 27.9. 2019.

Predsjednik Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	IV
POPIS OZNAKA	V
SAŽETAK.....	VIII
SUMMARY	IX
1. UVOD.....	1
2. Metode crpljenja nafte	2
2.1. Tipovi bušotina	3
2.2. Crpne cijevi	4
2.3. Metode iskorištavanja ležišta	5
2.3.1. Primarna faza iskorištavanja ležišta.....	5
2.3.2. Sekundarna faza iskorištavanja ležišta.....	5
2.3.3. Tercijarna faza iskorištavanja ležišta	6
2.4. Okolišni uvjeti rada u bušotinama	6
2.5. Problemi rada u bušotinama.....	6
2.6. Mehanizmi dotrajanja crpnih cijevi.....	8
2.6.1. Korozija.....	8
2.6.2. Trošenje zbog trenja.....	10
2.6.3. Moguća rješenja za mehanizme dotrajanja	12
3. Materijali i postupci ispitivanja svojstava materijala	13
3.1. Razvoj materijala i njihova podjela	13
3.1.1. Feritni čelici	13
3.1.2. Austenitni čelici	14
3.1.3. Martenzitni čelici	14
3.1.4. Dupleks čelici.....	15
3.2. Utjecaj legiranih elemenata	15
3.3. Zahtjevana svojstva materijala za crpne cijevi.....	17
3.4. Norme za izbor materijala.....	17
3.5. Mehanička svojstva.....	20
3.5.1. Mjerenje tvrdoće	20
3.5.2. Statičko-vlačno ispitivanje.....	21
3.5.3. Nerazorne metode ispitivanja	23
4. Eksperimentalna ispitivanja i rasprava	24
4.1. Mjerenje tvrdoće	27
4.2. Statičko-vlačno ispitivanje.....	29

4.3. Nerazorna metoda ispitivanja ultrazvukom	34
4.4. Metalografska analiza	36
4.5. Rezultati i analiza.....	39
5. ZAKLJUČAK.....	42
LITERATURA.....	44
PRILOZI.....	45

POPIS SLIKA

Slika 1. Shema bušotine [2].....	2
Slika 2. Tri vrste bušotina [3].....	3
Slika 3. Shema podzemnog opremanja bušotine [6]	4
Slika 4. Primjer oštećenja na crpnoj cijevi uzrokovanog korozijom, vanjsko oštećenje (naftno polje Žutica)	9
Slika 5. Primjer oštećenja na crpnoj cijevi uzrokovanog trenjem šipke, vanjsko puknuće (naftno polje Žutica).....	10
Slika 6. Primjer oštećenja na crpnoj cijevi uzrokovanog trenjem šipke, unutarnja oštećenja (naftno polje Žutica).....	11
Slika 7. Boje pridodane određenoj vrsti čelika [15].....	19
Slika 8. Nova i stara crpna cijev.....	25
Slika 9. Prikaz stijenke i oblika nove cijevi	26
Slika 10. Prikaz stijenke i oblika stare cijevi	26
Slika 11. Mjerenje tvrdoće na novoj cijevi	28
Slika 12. Mjerenje tvrdoće na staroj cijevi.....	28
Slika 13. Dimenzije plosnate epruvete za statičko-vlačno ispitivanje [16].....	29
Slika 14. Ispitne epruvete	30
Slika 15. Prihvati ispitnog uzorka pri statičkom-vlačnom ispitivanju	31
Slika 16. $\sigma - \epsilon$ dijagrami za epruvete N1, N2, N3	32
Slika 18. Označavanje mjesta za ispitivanje na cijevima.....	34
Slika 19. a) mjerenje debljine stijenke ultrazvukom	35
Slika 20. Uzorci zaliveni u polimernu masu	36
Slika 21. Usporedba dobivenih vrijednosti statičko-vlačnim ispitivanjem.....	39
Slika 22. Usporedba dobivenih vrijednosti mjerenjem tvrdoće	40
Slika 23. Usporedba vrijednosti dobivenih ultrazvučnim mjerenjem debljine stijenke.....	41

POPIS TABLICA

Tablica 1. Legirni elementi nehrđajućih čelika [13]	16
Tablica 2. Čelik klasificiran po veličini granice tečenja	18
Tablica 3. Mehanička svojstva čelika prema API 5CT	22
Tablica 4. Svojstva cijevi izrađenih od čelika P-110 prema API 5CT	24
Tablica 5. Kemijski sastav čelika P-110 prema API 5CT	24
Tablica 6. Vrijednosti tvrdoće izmjerene na cijevima.....	27
Tablica 7. Dimenzije epruveta izrađenih od nove cijevi	30
Tablica 8. Dimenzije epruveta izrađenih od stare cijevi	30
Tablica 9. Vrijednosti dobivene statičkim-vlačnim ispitivanjem za obje cijevi	31
Tablica 10. Debljina stijenke nove cijevi [mm]	35
Tablica 11. Debljina stijenke stare cijevi [mm]	35
Tablica 12. Mikrostruktura uzorka nove cijevi, slikana svjetlosnim mikroskopom pod različitim povećanjima	37
Tablica 13. Mikrostruktura uzorka stare cijevi, slikana svjetlosnim mikroskopom pod različitim povećanjima	38

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
R_e	N/mm ²	Granica razvlačenja
R_m	N/mm ²	Vlačna čvrstoća
HRC	HRC	Tvrdoća po Rockwellu
A	%	Istezljivost
Z	%	Kontrakcija
$R_{p0.2}$	N/mm ²	Konvencionalna granica razvlačenja
F_m	kN	Maksimalna sila
F_k	kN	Konačna sila

S_0	mm^2	Ploština početnog presjeka
L_0	mm	Početna mjerna duljina
F_0	N	Sila predopterećenja
F_1	N	Sila glavnog opterećenja
h	mm	duljina glave epruvete
L_t	mm	ukupna duljina epruvete
a	mm	debljina plosnate epruvete
b	mm	širina plosnate epruvete
B	mm	širina glave plosnate epruvete
E	N/mm^2	Youngov modul elastičnosti

ϑ	-	Poissonov omjer
α	W/mK	Koeficijent toplinske vodljivosti
β	C° ⁻¹	Linearni koeficijent toplinskog rastezanja

SAŽETAK

Cilj ovog rada je istražiti uzroke i posljedice djelovanja mehaničkog i korozivnog trošenja na mehanička svojstva crpnih cijevi u bušotinama nafte. Crpne cijevi su bitan dio proizvodnog sustava bušotine, a djeluju u teškim uvjetima rada pod povišenom temperaturom i tlakom stoga materijal za izradu mora imati zahtjevana svojstva za takve uvjete kako bi proizvodnost i radni vijek bušotine, i samih cijevi, bio optimalan.

U teorijskom dijelu rada opisan je način rada bušotine i funkcija crpnih cijevi te materijali od kojih se cijevi izrađuju. Također su opisani uvjeti rada cijevi, mehanizmi dotrajavanja te zahtjevana svojstva materijala koji se upotrebljavaju.

U eksperimentalnom dijelu rada izmjerena je tvrdoća, provedeno je statičko-vlačno ispitivanje, mjerena je debljina stijenke ultrazvučnom metodom i provedena je mikrostrukturalna analiza pod svjetlosnim mikroskopom. Rezultati provedenih ispitivanja pokazali su da najveći utjecaj na pad proizvodnosti crpnih cijevi ima mehaničko trošenje i korozija.

Ključne riječi: crpne cijevi, mehanička svojstva, trošenje, korozija, tvrdoća, vlačna čvrstoća

SUMMARY

The aim of this thesis is to investigate the causes and consequences of mechanical and corrosive wear on the mechanical properties of tubing pipes in oil wells. Tubing pipes are an integral part of the borehole production system and operate under heavy duty conditions at elevated temperature and pressure, therefore the tubing material must have properties for such conditions in order to optimize the productivity and service life of boreholes and pipes themselves.

In the theoretical part of the paper, the method of drilling and pumping functions and materials from which pipes are made is described. Also described are the working conditions of the pipes, the deteriorating mechanisms and the required properties of the materials being used.

In the experimental part of this paper hardness was measured, static-pressure test was performed, wall thickness was measured by ultrasound method and microstructural analysis under light microscopy was performed. The results of the conducted tests have shown that the greatest impact on the flow rate of tubing pipes was mechanical wear and corrosion.

Key words: tubing pipes, mechanical properties, wear, corrosion, hardness, tensile strength

1. UVOD

Značajnija primjena nafte počinje sredinom 19. stoljeća kada je iskopana prva bušotina te je počela energetska revolucija i iskorištavanje nafte iz njezinih ležišta. Otrkićem motora s unutarnjim izgaranjem i razvojem motorne industrije, raste i primjena nafnih derivata te sukladno tome razvoj materijala i postrojenja za crpljenje iste.

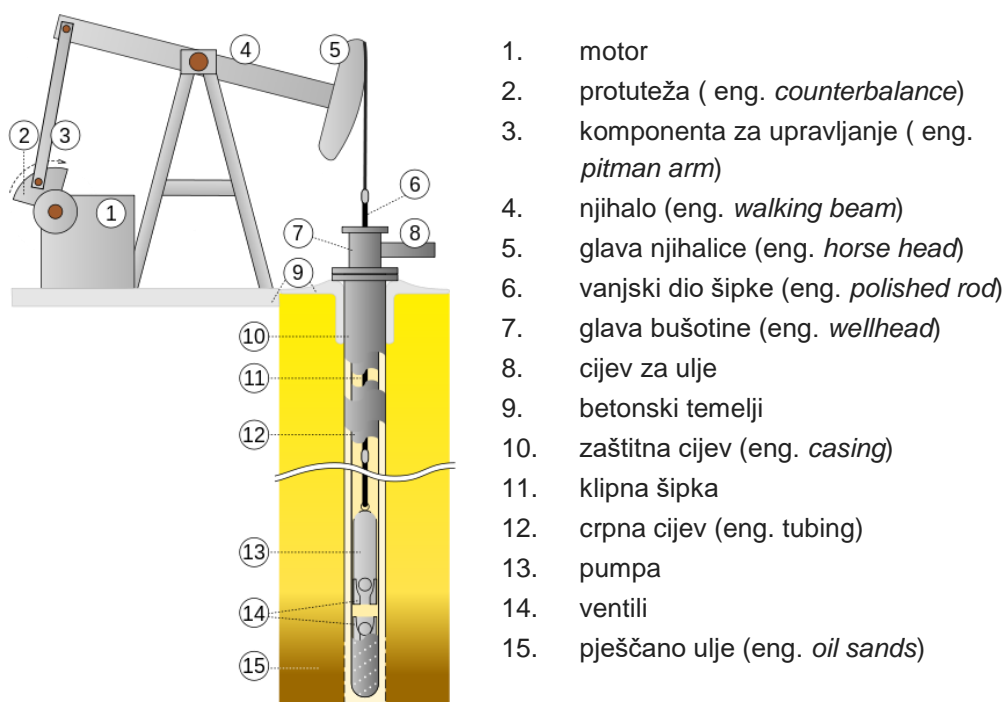
Danas je potražnja za proizvodnjom nafte i plina u konstatnom porastu. Zbog potrebe za visokom produktivnošću te slabom pristupačnosti i specifičnim uvjetima rada u bušotinama, zahtjeva se kvalitetno opremanje, osiguravanje kvalitetnog protoka, te pouzdanost i trajnost ugrađene opreme. Temeljna svrha crpnih cijevi je što kvalitetnija izvedba, dulji vijek trajanja i proizvodnost, u uvjetima u kojima se koriste – duboke bušotine, pod visokim tlakom, u medijima koji konstatno utječu na materijal od kojeg su cijevi napravljene. Uz razvoj petrokemijske industrije i potražnjom za naftnim derivatima, razvijaju se i materijali koji se koriste za izradu opreme korištene u eksploataciji nafte. Uvjeti u kojima se koriste crpne cijevi podrazumijevaju povišen tlak i temperaturu, agresivni medij, intenzivno trošenje i naprezanja, koji kontinuirano djeluju na eksploatacijska svojstva materijala i proizvodnost. Mehanička svojstva, eksploatacijske karakteristike, tribološka svojstva, otpornost na kemijske utjecaje i kemijski sastav od velike su važnosti pri izboru materijala za izradu crpnih cijevi. Od materijala se očekuje visoka otpornost na trošenje (posebice abrazivsko), otpornost na koroziju (rupičastu, interkristalnu, napetosnu...), dovoljna tvrdoća i čvrstoća kako bi izdržao naprezanja uzrokovana protokom kapljevine i u kontaktu s ostalom opremom unutar postavljene bušotine. S obzirom da je popravak i zamjena crpnih cijevi u bušotinama vrlo skup i kompliciran proces, odabir prikladnog materijala može ne samo povećati proizvodnost nego i produljiti vijek trajanja cijevi pa tako i same bušotine.

Cilj ovog rada je provesti ispitivanja na jednoj crpnoj cijevi korištenoj u naftnom polju Žutica, u blizini Ivanić Grada te komentirati dobivene rezultate uz osvrt na svojstva tog materijala i uvjete u kojima je cijev korištena. Utječu li eksploatacijski uvjeti, u ovisnosti o vremenu, u velikoj mjeri na mehanička svojstva pa tako i na proizvodnost same bušotine te koje su mjere poboljšavanja odnosno sprečavanja trošenja i propadanja opreme pokazat će provedena ispitivanja na dvije crpne cijevi.

2. Metode crpljenja nafte

Izvlačenje sirove nafte započinje jednostavnom radnjom bušenja. Bušenje na veliku dubinu sastoji se od tri dijela: razrušavanja stijene vrtnjom dlijeta (sam proces bušenja), uklanjanja krhotina stijene s dna bušotine ispiranjem ili ispuhivanjem pomoću isplake te zaštićivanja stijenki bušotine ugrađivanjem zaštitnih cijevi (eng. *casing*). [1]

Bušenje započinje dlijetom velikoga promjera, koje je pričvršćeno na kraju šipke. Rotiranjem pod opterećenjem, dlijeto reže, drobi stijenu i prodire u dubinu. Kad šipka s dlijetom uđe u zemlju čitavom duljinom, na nju se spojnicom nadoveže sljedeća šipka i rad se, uz stalno ispiranje dna bušotine, nastavlja do određene dubine. Tada se sustav šipki s dlijetom izvadi, a u bušotinu se radi zaštite od urušavanja postavljaju zaštitne cijevi i učvršćuju ulijevanjem cementa. S povećavanjem dubine primjenjuju se dlijeta i zaštitne cijevi sve manjeg promjera, do minimalno potrebnih za nesmetanu proizvodnju. [1] Na slici 2. prikazana je konstrukcija bušotine s osnovnom opremom koja se koristi u proizvodnji.

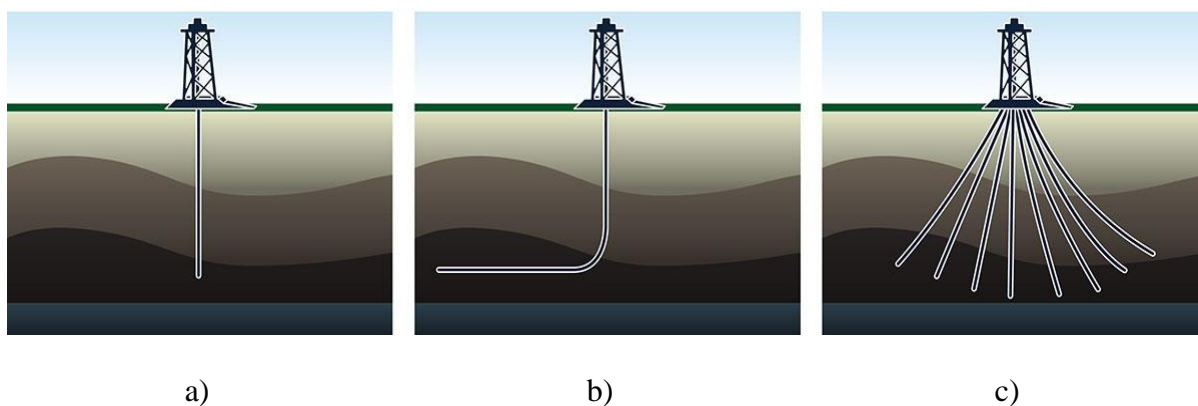


Slika 1. Shema bušotine [2]

2.1. Tipovi bušotina

Bušotine mogu biti okomite, horizontalne i koso usmjerene. Okomitim bušotinama najkraće se dopire do kolektorske stijene, no ne uvijek i najlakše. Ako treba prodrijeti do ležišta ispod naseljenog mjesta, nepristupačnog terena, vodenih površina i slično, izrađuje se zakrivljena bušotina (horizontalna – u obliku slova L ili koso usmjerena). Najmanja proizvodnost je kod okomito usmjerenih bušotina (zbog najmanje površine unutar ležišta), kod koso usmjerenih je veća, dok je najbolja proizvodnost kod horizontalno usmjerenih bušotina jer vodoravni kanali unutar ležišta znatno povećavaju površinu dreniranja iz koje pritječu nafta ili plin. [1]

Na slici 2. prikazana su tri tipa konstrukcija bušotine.

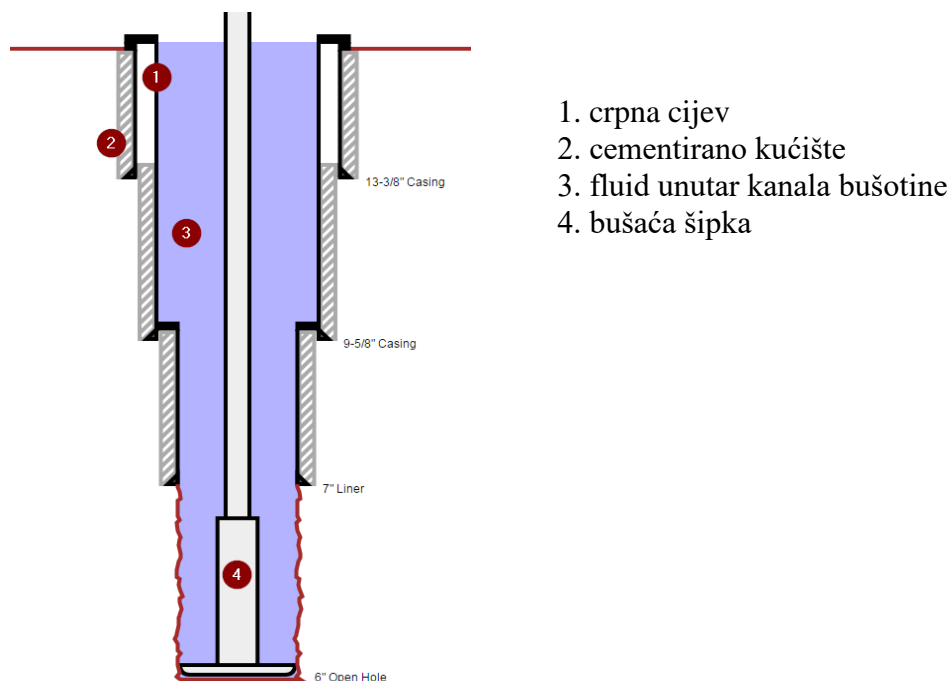


Slika 2. Tri vrste bušotina [3]

- a) horizontalna bušotina
- b) vertikalna bušotina
- c) koso usmjerena bušotina

2.2. Crpne cijevi

Crpne cijevi (eng. *tubing*) su niz cijevi koji služi za protjecanje fluida iz ležišta do površine ili fluida za utiskivanje s površine u ležište. Pravilan izbor, izrada i instalacija je bitan dio svake bušotinske konstrukcije. Može se postavljati kao slobodno obješena cijev ili u kombinaciji s izolacijskom alatkom koja omogućuje proizvodnju fluida i kontrolu tlakova u bušotini (eng. *paker*). [4] Izbor crpnih cijevi ovisi o minimalnoj i maksimalnoj temperaturi bušotine, tipu korozije koja će nastati zbog fluida u bušotini, najmanjem i najvećem vanjskom i unutarnjem tlaku, sigurnosnim aspektima i ekonomičnosti. Cijevi moraju biti određene veličine (promjera) kako bi osigurale konstantan protok fluida i učinkovito postavljanje opreme za umjetno podizanje kapljevine. Cijevi premalog promjera uzrokuju gubitke materijala zbog trenja i ograničava proizvodnju, dok preveliki promjer uzrokuje prevelik protok fluida i može opteretiti bušotinu. Također, dimenzije moraju biti točno određene kako bi crpne cijevi odgovarale već postavljenim zaštitnim cijevima. Pri odabiru materijala za izradu cijevi bitno je da je materijal otporan na koroziju i trošenje, dovoljno visoke čvrstoće i tvrdoće, postojan na visokoj, ali i niskoj temperaturi. [5] Na Slici 3. prikazan je izgled bušotine ispod zemljine površine.



Slika 3. Shema podzemnog opremanja bušotine [6]

2.3. Metode iskorištavanja ležišta

Dva su načina izvlačenja nafte na površinu: samoizlijevanje (eruptiranje) i mehaničko podizanje. Nafta u bušotinama eruptira samo u početnoj fazi iskorištavanja ležišta, dok je tlak dovoljno visok. Kada tlak postane nedostatan za izvlačenje nafte eruptiranjem, primjenjuje se podizanje pomoću plina ili dubinskih sisaljki.

Ležišta nafte mogu biti izolirana od ostalih naslaga i fluida, ili okružena vodenim bazenima (akviferi) na dnu i nasvođena plinskom kapom na vrhu, stoga postoje razne metode iskorištavanja ležišta. Tri poznate metode proizvodnje nafte su primarna, sekundarna i tercijarna. [7]

2.3.1. Primarna faza iskorištavanja ležišta

U primarnoj fazi koriste se prirodni režimi iskorištavanja čija je osnova eruptiranje. Elastični režim temelji se na stlačivosti nafte, stijene i vezane vode. Režim otopljenoga plina uključuje istiskivanje nafte plinom koji je u njoj bio otopljen. Gravitacijski režim je pod posebnim uvjetima najučinkovitiji, ali je njegova pojava u prirodi rijetka, a ekonomičnost uspostave i vođenja upitna stoga se ne primjenjuje često. Režim plinske kape koristi potiskivanje nafte plinom s vrha prema dnu ležišta, a vodonaporni režim koristi dotok vode iz *akvifera* i istiskivanje nafte iz ležišta. Vodonaporni režim je ujedno i najučinkovitiji jer koristi vodu iz ležišta za potiskivanje nafte prema površini, koja je po gustoći najsličnija nafti pa ne dolazi do mješanja tekućina. Ovim načinom može se iscrpiti od 5 do 20% nafte iz ležišta. [7]

2.3.2. Sekundarna faza iskorištavanja ležišta

U sekundarnoj fazi poboljšava se režim iskorištavanja nafte fizičkim djelovanjem, korištenjem pumpi i kompresora, održavanjem ležišnog tlaka. Oponašanjem djelotvornih prirodnih režima plinske kape i vodonapornoga režima, istiskivanjem nafte utisnutim plinom ili vodom s površine te zavodnjavanjem (utiskivanjem slojne vode, koja se nalazi u kapljevini izvučenoj iz zemlje uz naftu i plin, a odvaja se i nazad potiskuje u zemlju, u ležište) povećava se iscrp nafte od 20 do 35%. [7]

2.3.3. Tercijarna faza iskorištavanja ležišta

Tercijarnim fazama iscrpnost nafte može se povećati i do 60% u idealnim uvjetima. One utječu na promjenu kemijskih svojstava utiskivanjem ugljikovog dioksida, dušika, bakterija ili kemikalija, toplinskom obradom stijena te smanjenjem međupovršinskih napetosti i oslobađanjem nafte u pornom prostoru. [7]

2.4. Okolišni uvjeti rada u bušotinama

Prilikom bušenja i postavljanja bušotine, posebna pažnja se pridodaje površinskim i potpovršinskim uvjetima kao što su temperatura ležišta, tlak u pornom prostoru, porozitet, stabilnost bušotine, permeabilnost, fizičke karakteristike stijene (sastav i diskontinuitet u volumenu), gradijent loma i sadržaj gline. Prema ovim uvjetima se odabire tekućina za hlađenje, oprema koja se ugrađuje u bušotinu i konačna izvedba bušotine. [4]

Temperatura na ušću bušotine bit će niža od temperature na dnu, ali ovisi o vrsti fluida koji se proizvodi, količini protoka i omjeru plina i tekućine. Pri proizvodnji gdje se dobiva voda, nafta ili njihova smjesa temperatura na ušću je veća od temperature okoline, dok je kod proizvodnje zapljinjenog fluida temperatura na ušću manja od okolišne temperature. Promjena tlaka u cijevi ovisi o nagibu krivulje i visini fluida u cijevi koji pak ovisi o tlaku u ležištu i gradijentu fluida pri opremanju i održavanju bušotine. Četiri su tlaka koja utječu na stanje u cijevi – tlak u ležištu, tlak na ušću pri proizvodnji, tlak utiskivanja na dnu bušotine, tlak obrade na dnu bušotine. Pri odabiru crpnih cijevi ponajviše se gleda promjena tlaka i temperature s obzirom na dubinu bušotine. [8]

2.5. Problemi rada u bušotinama

Uvjeti rada koji karakteriziraju već postavljenu bušotinu su velika dubina (duljina kanala), visok postotak vode u proizvodnji, visoka slojna temperatura, visok plinski faktor, različite karakteristike područja rada (pijesak, glina, stijena) koje nose različite zahtjeve, stalna korozija pod djelovanjem tekućine unutar i oko kanala, zakrivljenost kanala, parafin u kanalu i bakterije u ležištu. [5]

Duljina kanala na sebe veže veće temperature i tlakove rada i veće trenje šipke uz crpnu cijev zbog zakrivljenosti cijevi. Također utjecaj na zakrivljenost crpnih cijevi, i trenje koje nastaje sudaranjem klipne šipke o stijenke, ima i težina stupca fluida koji se s duljinom kanala povećava. Veće trenje – veće trošenje spojnice klipnih šipki i stijenki crpnih po kojima stružu spojnice. [5]

Visok postotak vode u proizvodnji ne samo da smanjuje količinu nafte koja se izvuče iz ležišta nego smanjuje vijek trajanja pumpe djelovanjem korozije i nastalog kamenca na stijenkama kanala koji smanjuje protok fluida kroz kanal. [5]

Kamenac i pijesak često čepi perforacije i smanjuju dotok fluida iz sloja te se tada kučište mora ispirati kako bi se vratio zadovoljavajući protok. Čepljenje perforacija također uzrokuju i bakterije koje se 'hrane' ugljikovodicima i tvore talog koji čepi perforacije te tako povećava tlak utiskivanja vode u sloj, povećava opterećenja na površinskim pumpama, smanjuje profil utiskivanja vode kroz crpnu cijev i često je uzrok popravaka na bušotinama. [5]

Još jedan uzrok nakupina na stijenkama tubinga je parafin koji je podložan otvrdnjavanju (želatiniziranju) pod hlađenjem. Nastaje do 400 m od vrha bušotine i uzrokuje prihvat klipnih šipki uz *crpnu cijev* (što je najveći problem kod bušotina koje rade na principu sisaljki gdje je hermetičnost važna za pravilan rad sisaljki). [5]

2.6. Mehanizmi dotrajanja crpnih cijevi

Glavni izvori oštećenja tubinga su prije svega korozija i trošenje trenjem i abrazijom.

2.6.1. Korozija

Korozija je spontano razaranje materijala pod djelovanjem okolnog medija – plina, kapljevine ili kurith agresivnih čestica. Korozijska postojanost je svojstvo otpornosti materijala na djelovanje okolnog medija.

Dva su uvjeta koja moraju biti ispunjena da bi čelik bio otporan na koroziju: barem 12% kroma otopljenog u čeliku i monofazna mikrostruktura koja se postiže legiranjem alfa genim elementima (Cr, Ni, Mn, Co, Cu, N). [6]

Korozija proizvodne opreme uzrokovana plinovima i vodom iz kapljevine troši cijevi, pospješuje odlaganje produkata korozije u kanalu bušotine te začepљуje proizvodnu opremu. [5] Tipično oštećenje u petrokemijskoj industriji je krhkost i umor materijala zbog korozije te propuštanje ili prokapavanje cjevovoda – u razvijenom stadiju korozijskog oštećenja. Korozija također može biti uzrokovana raznim spojevima sa sumporom koji nastaju pri proizvodnji, kisikom (pretežito na površini) i ugljične kiseline (H_2CO_3). [9] Tipovi korozije koji nastaju su :

1. pitting - ne nastupa na cijeloj površini, očituje se malim jamicama koje postepeno prelaze u rupice zbog nehomogenosti u strukturi ili kemijskom sastavu, postojanje elektrolita (vodene otopine, vlažni plinovi) [10]

2. napetosna korozija - nastupa kada je dio istovremeno izložen djelovanju agresivanog medija i vlačnog naprezanja, na hladno deformiranim lokalitetima zbog zaostalih naprezanja. Najotporniji su feritni čelici s višim udjelom Cr i legirani Mo [10]
-na crpne cijevi najviše utječe sulfidna napetosna korozija (eng. *Sulphide Stress Cracking*) koja nastupa ako je vlačno opterećen dio u dodiru sa sumporovodikom što u konačnici dovodi do nastajanja mikropukotina (najotporniji su austenitni Cr-Ni čelici) [9]

3. interkristalna korozija – napreduje nevidljivo, duž granica kristalnih zrna čime se razara metalna veza u mikrostrukтури čelika, po granicama zrna izlučuju se nečistoće i različiti spojevi legiranih elemenata (npr. karbidi ili oksidi) različitog potencijala u odnosu na okolna zrna. Najviše pogađa austenitne Cr-Ni i feritne Cr čelike, posebno u cijevima kroz koje struji agresivni medij (dušična, kloridna, razrijeđena sumporna kiselina) jer razaranje materijala počinje na unutarnjoj površini i napreduje prema vanjskoj. [10]

4. korozija u procijepu – nastaje ako postoji dovoljna zračnost između dva dijela da u nju uđe elektrolit, ali istovremeno premalu da dođe do obnavljanja dotoka elektrolita i kisika. Ovaj oblik je najintenzivniji u kloridnim otopinama (morska voda) na spojevima dvije crpne cijevi. [10]

5. erozija – nastupa uz istovremeno djelovanje agresivnog medija i mehaničkog trošenja uzrokovanog nestrujavanjem plina, tekućine ili pare [11]

Na slici 4. prikazane su crpne cijevi koje se koriste u naftnom polju Žutica, oštećene zbog djelovanja korozije.



Slika 4. Primjer oštećenja na crpnoj cijevi uzrokovanog korozijom, vanjsko oštećenje (naftno polje Žutica)

2.6.2. Trošenje zbog trenja

Trošenje je gubitak materijala s površine krutog tijela uslijed dinamičkog dodira s drugim tijelom, fluidom i/ili česticama, uzrokovano trenjem dvaju materijala. [11] Mehanizmi trošenja koji prevladavaju u cjevovodima su abrazija, umor površine i tribokorozija.

Trošenje zbog trenja je najviše zastupljeno kod bušotina s mehaničkim podizanjem kapljevine (klipne pumpe pogonjene njihalicom) zbog pomicanja klipne šipke koja struže po stijenkama crpnih cijevi. Na trenje utječe i tvrdoća materijala šipke i tubinga. Ako je klipna šipka od znatno tvrdjeg materijala nego crpna cijev, ona se troši i zbog umora površine mogu nastati rupe u stijenkama kroz koje se propušta plin i fluidi u zaštitne cijevi. Veće je trenje što je dulji kanal bušotine jer dolazi do savijanja crpnih cijevi i na tim mjestima je najveće oštećenje materijala (umor materijala, nastanak pukotina i u krajenjem slučaju lom cijevi). [5] Na slikama 5. i 6. prikazane su crpne cijevi koje su terminalno oštećene zbog trošenja trenjem.



Slika 5. Primjer oštećenja na crpnoj cijevi uzrokovanog trenjem šipke, vanjsko puknuće (naftno polje Žutica)



Slika 6. Primjer oštećenja na crpnoj cijevi uzrokovano trenjem šipke, unutarnja oštećenja (naftno polje Žutica)

Pijesak, kao čestice u kapljevini koje se iznose s dna bušotine na površinu, ima abrazivno djelovanje na dubinsku opremu sisaljke te na priključne i tlačne naftovode. Abrazija je trošenje istiskivanjem materijala, uzrokovano tvrdim česticama ili tvrdim izbočinama. [11] Čestice pijeska prolaze kroz crpnu cijev, grebu površinu i stanjuju stijenke cijevi te tako smanjuju mogućnost održavanja stabilnog tlaka i skraćuju vijek trajanja cijevi što na kraju može dovesti do nastanka rupa ili puknuća samih cijevi.

Taloženje pijeska na sjedištima ventila, abrazija sjedišta i kuglica, kućišta, cilindra i klipova, zapunjenost klipa i cilindra, potisne korpe itd. samo su neki od kvarova sisaljki uzrokovanih pijeskom u proizvodnji. [5]

2.6.3. Moguća rješenja za mehanizme dotrajanja

Neka od rješenja za ove mehanizme dotrajanja su odabir odgovarajućeg materijala za uvjete proizvodnje kako bi se smanjilo korozivno djelovanje CO₂ i H₂S, a utjecaj proboja vode upotrebom dva pakera, mehaničkog čepa ili cementacijom zavodnjenog dijela. Problem zakrivljenosti kanala bušotine i trošenja koje nastaje zbog trenja klipne šipke o crpnu cijev, rješava se korištenjem klipnih šipki sa centralizerima, uređajima koji pomažu centrirati klipnu šipku. Odabir odgovarajuće sisaljke odgovor je na problem taloženja pijeska i njegovog abrazivnog djelovanja od ležišta do vrha bušotine te kvalitetno ispiranje bušotine do dna i zamjena čistim fluidom. Pojava kamenca, taloga kalcija ili magnezija pod djelovanjem CO₂ smanjuje se inhibiranjem bušotina protiv kamenca, kiselinskim pranjem perforacija, podizanjem dubinske sisaljke u zonu bušotine kod koje je manje taloženje kamenca (tamo gdje je manja temperatura) i drugim metodama.

3. Materijali i postupci ispitivanja svojstava materijala

3.1. Razvoj materijala i njihova podjela

Nehrđajući čelici razvijeni su početkom 20. stoljeća, a to su čelici koji sadrže najmanje 12 % udjela kroma sa ili bez dodataka ostalih legirajućih elemenata (Ni, Mo, Ti, W). Drugi bitni uvjet za korozijsku postojanost je homogena monofazna mikrostruktura da bi se izbjegla opasnost nastanka lokaliteta čiji je elektropotencijal različit od potencijala osnovne mase čelika tj. opasnost pojave galvanskih članaka u strukturi. [10] Nehrđajući čelici postižu korozijsku postojanost nastajanjem tankog oksidnog filma koji je bogat kromom. Taj se oksidni film Cr_2O_3 spontano oblikuje i održava na površini nehrđajućih čelika u prisustvu kisika, čime dolazi do pasivacije. Nastali pasivni površinski film kromovih oksida, ukoliko je pravilno formiran i homogen, temelj je korozijske postojanosti ovih legura. Pored kroma, postojanost prema koroziji povećava se dodatkom nikla. Kombinacijom legiranja kromom i niklom razvijeni su čelici tipa 18/8 (18% Cr i 8% Ni), s austenitnom mikrostrukturom koji su otporni na djelovanje kiselina. Legiranje molibdenom omogućava lakše pasiviziranje, te poboljšava korozijsku postojanost i otpornost na jamičastu koroziju Cr-Ni čelika. Legiranjem jakim karbidotvorcima, npr. titanij, niobij, omogućava se izbjegavanje pojave interkristalne korozije. Općenito vrijedi da skupina korozijski postojanih čelika mora sadržavati:

- feritotvorce – Cr, Si, Al, Mo, Nb, Ti
- austenitotvorce – Ni, Mn, (Co), Cu, N.

Nehrđajući ili korozijski postojani čelici dijele se prema nastaloj mikrostrukturom na: feritne, austenitne, austenitno-feritne (dupleks) i martenzitne čelike. [11]

3.1.1. Feritni čelici

Osnovne karakteristike feritnih nehrđajućih čelika su dobra otpornost na napetosnu, rupičastu i koroziju u procijepu, osobito u medijima koji sadrže sumporne plinove, oksidirajuće kiseline i kloridne otopine. Primjenjuju se u slučajevima gdje je otpornost na koroziju važnija od mehaničkih svojstava, ali ne na temperaturi višoj od 400°C zbog nastanka krhkih faza. Prema sadržaju Cr feritni čelici se dijele na: čelike s nižim udjelom kroma (10,5 - 14 % Cr), čelike sa srednjim udjelom kroma (14 - 18 % Cr) i čelike s visokim udjelom kroma (18 - 30 % Cr). Određeno povećanje čvrstoće moguće je postići dodavanjem dušika i ugljika, ali to nosi

opasnost od pojave krhkosti (pogotovo na niskim temperaturama). Nemaju sposobnost fazne transformacije i usitnjenja kristalnog zrna, što znači da ne mogu očvrnuti postupcima toplinske obrade ili se zakaliti. U praksi se, za povećanje čvrstoće feritnih čelika, najčešće koristi hladna deformacija, ali isporučuju se u žarenom i toplo valjanom stanju. Zbog niskog sadržaja legiranih elemenata jeftiniji su od austenitnih čelika. [10, 12]

3.1.2. Austenitni čelici

Austenitni čelici primjenjuju se u uvjetima kada se traži dobra postojanost na atmosfersku koroziju i koroziju na povišenoj temperaturi. Svi austenitni čelici imaju dobru žilavost i duktilnost, te postižu značajnu istezljivost tijekom vlačnog opterećenja. Legiraju se elementima koji osiguravaju formiranje austenitne mikrostrukture: niklom, dušikom i bakrom. Ovakvi čelici uz visoki udio kroma imaju i visoki udio silicija, a često i aluminijske i ugljika, čime se značajno povisuje otpornost na oksidaciju i pougljičavanje te čvrstoća na visokoj temperaturi. Maksimalna temperatura primjene je oko 760°C, nakon koje dolazi do smanjenja čvrstoće i otpornosti na oksidaciju. Zbog visokog udjela legiranih elemenata, austenitni čelici su skuplji od martenzitnih čelika i feritnih s nižim sadržajem kroma. [10, 12]

3.1.3. Martenzitni čelici

Osnovna svojstva martenzitnih čelika su izvanredna kombinacija korozijske postojanosti, visoke tvrdoće i čvrstoće, dobre otpornosti na toplinski i mehanički umor i izvrsne otpornosti na trošenje. Mehanička svojstva i kemijska postojanost martenzitnih nehrđajućih čelika ovise o kemijskom sastavu i provedenoj toplinskoj obradi. Toplinska obrada martenzitnih čelika sastoji se od sferoidizacijskog žarenja, austenitizacije, gašenja, dubokog hlađenja (po potrebi) i popuštanja (po potrebi i više puta). Ako u metalnoj osnovi ima više kroma, bolja je korozijska postojanost. Ako ima više ugljika viša je tvrdoća, čvrstoća i otpornost na trošenje, a lošija korozijska postojanost, zavarljivost i žilavost. U odnosu na austenitne, imaju višu tvrdoću, čvrstoću i otpornost na trošenje. [10, 12]

3.1.4. Dupleks čelici

Struktura dupleks čelika sastavljena od 40-60% ferita i austenita. Osnovni legirni elementi, osim kroma i nikla, su dušik, molibden, volfram i bakar. Dušik je izraziti gamageni element, promiče austenitnu fazu i povisuje otpornost na rupičastu koroziju, a nizak postotak ugljika dodatno jamči i otpornost prema interkristalnoj koroziji. Imaju vlačnu čvrstoću i granicu razvlačenja višu nego austenitni čelici i dobru žilavost. Postojanost dupleks čelika prema rupičastoj koroziji (pittingu) je jako dobra zahvaljujući prvenstveno visokom udjelu kroma, volframa, molibdena i dušika. Zbog visokog masenog udjela kroma i nižeg udjela nikla osobito su otporni prema napetosnoj koroziji u kloridnom okruženju. Uz prethodna svojstva, i bolju otpornost na abraziju (jer imaju veću tvrdoću), bolji su izbor od austenitnih čelika, no znatno su i skuplji. Navedena svojstva omogućuju smanjenje nosivih presjeka i smanjenje ukupne mase proizvoda te se zbog toga plinovodi i naftovodi često rade od ovih čelika. [10, 12]

3.2. Utjecaj legirnih elemenata

U cilju očuvanja svojstava i sprječavanja mikrostrukturnih promjena tijekom zavarivanja i toplinske obrade, proizvode se različite vrste nehrđajućih čelika za razne namjene i uvjete u kojima se koriste. Da bi se postigla najbolja moguća iskoristivost čelika i krajnjeg proizvoda, čelici su legirani s raznim elementima, od kojih svaki daje specifična svojstva čeliku. Potrebno je legirati čelik u pravilnim omjerima, jer je dokazano da previše legirnih elemenata može izazvati i brojne neželjene kontraefekte [13].

- Austenitni legirni elementi: Cr, C, Ni, Mo, N, Al, Cu, Ti, Nb, Ta, Se, S
- Feritni legirni elementi: Cr, C, Mo, Ti, Nb, Al, Si, Ni, Mn
- Martenzitni legirni elementi: Cr, C, V, Mo, W, Ti
- Dupleks legirni elementi: Cr, C, Ni, N, Mo, Cu, Si, W

U tablici 1. navedeni su legirni elementi nehrđajućih čelika i njihov utjecaj kod legiranja.

Tablica 1. Legirni elementi nehrđajućih čelika [13]

Element	Struktura	Karakteristike
C	Gamageni element	Povišuje čvrstoću, tvrdoću, snižava žilavost i isteljivost, u velikim količinama može biti problematičan i stvarati Cr_{23}C_6 te uzrokovati interkristalnu koroziju
Cr	Alfageni element	Poboljšava otpornost koroziji i oksidaciji, povišuje čvrstoću, smanjuje žilavost i istezljivost
Ni	Gamageni element	Poboljšava čvrstoću pri povišenim temperaturama i korozijsku otpornost, povišuje žilavost, smanjuje otpornost na napetosnu koroziju
Co	Gamageni element	Povećava čvrstoću pri povišenim temperaturama, usporava rast zrna pri povišenim temperaturama
Nb	Alfageni element	Dodaje se čeliku zato što uzrokuje stvaranje finog zrna i povećanje čvrstoće
Mo	Alfageni element	Poboljšava čvrstoću pri povišenim temperaturama, poboljšava antikorozivnost pri djelovanju reducirajućih medija, Poboljšava otpornost prema rupičastoj koroziji
P, S, Se	-	Olakšava obradu ovajanjem čestica, pogoršava zavarljivost i antikorozivnost
Si	Alfageni element	Poboljšava vatrootpornost (otpor oksidaciji), dodaje se zbog dezoksidacije
Ti	Alfageni element	Veže se za ugljik (najači karbidotvorac) i spriječava interkristalnu koroziju, usitnjuje zrno
Mn	Gamageni element	Spriječava vruće pukotine stvaranjem MnS , dodaje se zbog dezoksidacije, poboljšava mehanička svojstva

3.3. Zahtjevana svojstva materijala za crpne cijevi

Materijali koji se odabiru za izradu crpnih cijevi moraju imati točno određena svojstva kako bi im vijek trajanja i kvaliteta rada bila što duža u uvjetima u kojima se nalaze. Svojstva koja su od velikog značaja za crpne cijevi su tribološka svojstva (otporost na abraziju i tribokemijsko trošenje), eksploatacijske karakteristike (lomovi, istrošenje, korozijsko dotrajanje), mehanička svojstva (tvrdoća, ispitivanje uz statičko vlačno opterećenje, ispitivanje uz udarno opterećenje), sastav i mikrostruktura materijala (kemijski sastav) i proizvodna svojstva (toplinska obradljivost, rezljivost). [14]

Pri određivanju otpornosti materijala za cijevi na naprezanja potrebno je uzeti u obzir sljedeće [14]:

- Youngov modul elastičnosti (omjer naprezanja i deformacije u elastičnom području) koji je za najveći broj čelika koji se upotrebljavaju u naftnom rudarstvu $E=21 \cdot 10^{10}$ N/mm²
- Poissonov omjer (ν) (omjer između uzdužne i poprečne deformacije) koji za čelike iznosi 0,3
- Koeficijent toplinske vodljivosti (α) za čelične cijevi iznosi 58 W/mK
- Linearni koeficijent toplinskog rastezanja (β) za čelične cijevi je $12,43 \cdot 10^{-6}$ C°⁻¹
- Apsolutna hrapavost čeličnih cijevi je od 0,03 do 0,3 mm
- Gustoća čeličnih cijevi obično iznosi 7850 kg*m⁻³

3.4. Norme za izbor materijala

Svi postupci i norme za proizvode u naftnoj industriji su određeni prema API standardu kojeg je odredio Američki naftni institut (American Petroleum Institute). Da bi udovoljile kriterije prema API specifikacijama, crpne cijevi moraju biti: odgovarajuće težine po metru dužine, odgovarajuće duljine i vanjskog promjera, određene debljine stijenki, kalibriranog unutarnjeg promjera, određene kvalitete materijala i udovoljiti pri hidrostatičkim tlačnim probama. [14]

Kvaliteta materijala definirana je slovima i brojkama koje označavaju različite karakteristike materijala cvijevi. Kod API oznaka brojevi označavaju minimalnu vrijednost granice tečenja. Čelik s oznakom J-55 ima npr. granicu tečenja 379,2 N/mm² (55 000 psi), odnosno cijev može podnijeti takav iznos naprezanja uz trajno istezanje od 0,5%. [14]

Tablica 2. prikazuje crpne cijevi klasificirane po iznosu granice tečenja. Te vrijednosti se rabe za izračunavanje izdržljivosti cijevi s obzirom na sile uzrokovane vlastitom težinom i na djelovanje vanjskog i unutarnjeg tlaka.

Tablica 2. Čelik klasificiran po veličini granice tečenja

API oznaka čelika	KONVENCIONALNA GRANICA RAZVLAČENJA		MINIMALNA VLAČNA ČVRSTOĆA [N/mm ²]	MINIMALNO PRODULJENJE [%]
	minimum	maksimum		
H-40	275,8	-	413,6	25,5
J-55	379,2	551,5	517,1	24,0
K-55	379,3	551,5	654,9	19,5
N-80	758,3	758,3	689,4	18,5
L-80	551,5	655,0	689,4	19,5
C-90	630,0	723,0	689,4	18,5
C-95	655,0	758,3	723,0	18,0
T-95	655,0	758,3	723,0	18,0
P-110	758,0	965,0	861,0	15,0
Q-125	861,0	1034,0	930,0	18,0

Objašnjenja označavanja [10]:

H – hladno valjani plosnati proizvodi od čelika visoke čvrstoće za hladno oblikovanje

J , K – čelici ispitani u posebno naznačenim uvjetima

N – normalizacijski žareno ili normalizacijski valjano

L – čelici za cjevovode

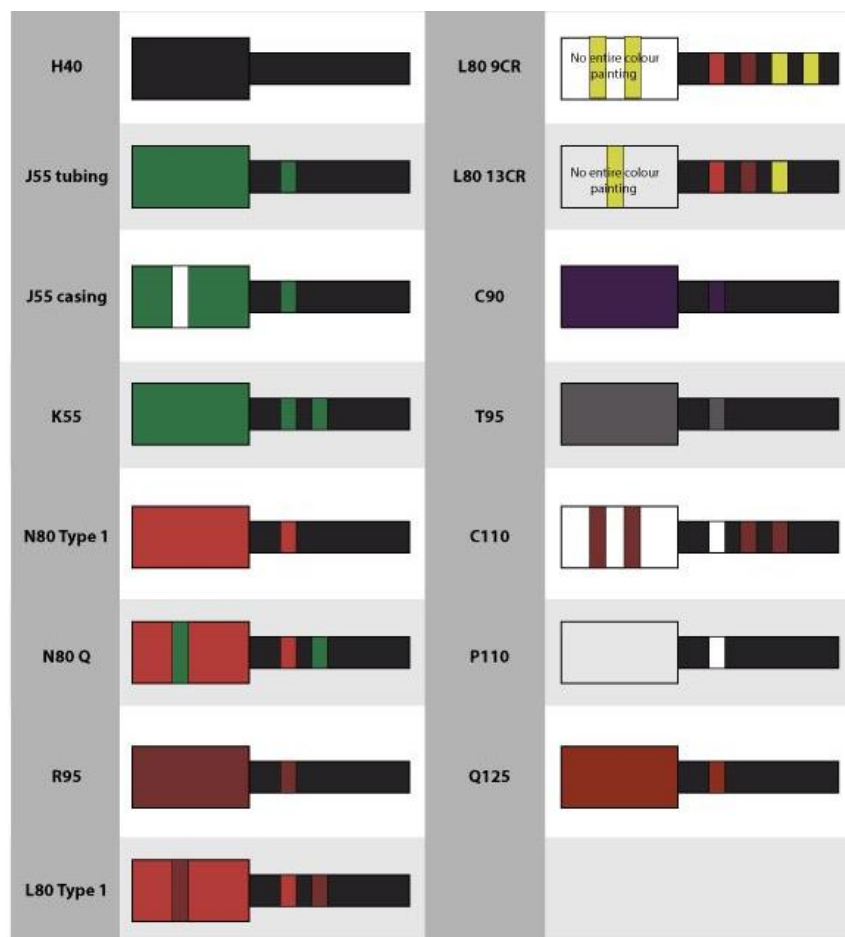
C – posebno hladno obradljivo

T – pokositreni valjani proizvodi

P – čelici za rad pod povišenim tlakom

Q – poboljšano (eng. *quenched*)

S obizrom da sve cijevi izvana izgledaju gotovo jednako, boja se određenim bojama kako bi se lakše razlikovale i pravilno uparile sa zaštitnim cijevima. [15]



Slika 7. Boje pridodane određenoj vrsti čelika [15]

3.5. Mehanička svojstva

Mehanička svojstva materijala, kao i sva ostala svojstva, posljedica su strukturnog stanja materijala. Strukturno stanje nekog materijala dobiva se obradom materijala određenog (kemijskog) sastava određenim tehnološkim postupkom. Tako se izborom materijala i odgovarajućeg tehnološkog postupka postiže ciljano (mikro)strukturno stanje koje će dati željena (mehanička) svojstva – elastičnost, čvrstoću, žilavost i tvrdoću. [16]

- Tvrdoća - otpornost materijala prema prodiranju drugoga znatno tvrđega tijela
- Elastičnost - svojstvo čvrstih tijela da pod utjecajem vanjske sile mijenjaju svoj oblik ili volumen i da, nakon prestanka njezina djelovanja, vraćaju u prvotni oblik
- Čvrstoća - mehaničko svojstvo materijala da pruža otpor djelovanju sile
- Žilavost - žilavost materijala je svojstvo koje govori o sposobnosti apsorpiranja mehaničke energije, uzrokovane vanjskim, uglavnom udarnim opterećenjem, putem plastične deformacije materijala [17]

3.5.1. Mjerenje tvrdoće

Mjerenje tvrdoće je jedan od osnovnih postupaka ispitivanja mehaničkih svojstava. Ispitivanje se provodi brzo i lako, a rezultati ispitivanja mogu poslužiti za procjenu drugih mehaničkih svojstava (npr. vlačne čvrstoće ili otpornosti na abrazijsko trošenje). Za mjerenje tvrdoće nisu potrebni posebno izrađeni uzorci već je mjerenje moguće, ovisno o metodi, na poluproizvodima ili čak na gotovim proizvodima. Ispitivanje tvrdoće neznatno oštećuje površinu ispitivanoga predmeta pa se uvjetno može svrstati među nerazorne metode. Uređaji za mjerenje tvrdoće (tvrdomjeri), u pravilu su jednostavniji i jeftiniji od nekih drugih uređaja za ispitivanje mehaničkih svojstava (npr. kidalica, puzalica). Metode mjerenja tvrdoće mogu biti statičke (Brinell, Rockwell i Vickers metoda) ili dinamičke (Shore i Poldi). [18]

Određivanje tvrdoće provodi se u dva općenita koraka:

1. utiskivanje indentora u ispitni uzorak pod propisanim uvjetima
2. određivanje karakterističnih dimenzija otiska (srednja vrijednost promjera, srednja vrijednost dijagonale ili dubina otiska)

U ovom radu koristit će se Rockwell metoda za ispitivanje tvrdoće. Kod Rockwell metode mjeri se dubina prodiranja penetratora, a vrijednost tvrdoće očitava neposredno na skali tvrdomjera nakon rasterećenja. Prednosti ove metode su plitak otisak, neposredno očitavanje nakon rasterećenja i brzina mjerenja. Mjerno područje HRC metode je od 20 do 70, npr. 59 HRC je iznos tvrdoće izmjeren Rockwell HRC metodom i možemo ga dalje koristiti kao referentan podatak u ispitivanju svojstva materijala. Odvija se u tri faze:

1. predopterećenje – $F_0 = 98 \text{ N}$, penetrator prodire u dubinu i postiže početni položaj mjerenja
2. glavno opterećenje – $F_1 = 1373 \text{ N}$, dodaje se na predopterećenje i utiskuje penetrator na dubinu h_1
3. rasterećenje – otklanjanje glavnog opterećenja, povrat elastičnih deformacija u uzorku nastalih u drugoj fazi i penetrator se zaustavlja na dubini h_2 ($h_2 < h_1$) [18]

3.5.2. Statičko-vlačno ispitivanje

Statički vlačni pokus je postupak ispitivanja kojim se utvrđuju osnovne značajke mehaničkih svojstava te neka svojstva kojima se opisuje i deformabilnost materijala, a ujedno je i najčešće primjenjeno ispitivanje. Prirast sile pri statičkom vlačnom ispitivanju u jedinici vremena mora biti takav da prirast proizvedenog naprezanja bude 10 N/mm^2 u sekundi, a izvodi se na kidalici. Ispitivanje se provodi na ispitnim uzorcima (epruvetama) okruglog ili četvrtastog poprečnog presjeka. Ispitivanje se vrši stavljanjem i stezanjem ispitne epruvete u čeljusti kidalice, povećava se vlačna sila koja epruvetu izdužuje, te na kraju epruvetu dovodi do puknuća. Rezultat statičkog vlačnog ispitivanja jest $\sigma - \epsilon$ dijagram koji nam daje konkretne informacije o mehaničkoj otpornosti i deformabilnosti materijala [16].

Bitne informacije koje možemo izvući iz $\sigma - \epsilon$ dijagrama su:

- R_{eH} – gornja granica razvlačenja
- R_{eL} – donja granica razvlačenja
- R_m - vlačna čvrstoća
- R_k - konačno naprezanje
- E - modul elastičnosti
- A - istezljivost
- Z - kontrakcija

API kvaliteta čelika definira istovremeno i čvrstoću materijala od kojeg je cijev izrađena. U Tablici 2. prikazana su mehanička svojstva čelika prema API standardima. Specifikacijom prema API 5CT kontroliraju se minimalna vlačna čvrstoća i minimalno produljenje cijevi za svaku kvalitetu. [14] U tablici 3. navedena su mehanička svojstva čelika prema normi API 5CT.

Tablica 3. Mehanička svojstva čelika prema API 5CT

OZNAKA	KONVENCIONALNA GRANICA RAZVLAČENJA [N/mm ²]		VLAČNA ČVRSTOĆA [N/mm ²]		I STEZLJIVOST [% od 50.8 mm]	TVRDOĆA [HRC]
	minimum	maksimum	minimum	maksimum		minimum
H-40	275,8	-	413,6	-	32	-
J-55/ZELENO	379,2	551,5	517,1	-	25	-
K-55/2*ZELENO	379,2	551,5	654,9	-	19,5	-
C-90	630,0	723,0	689,4	-	18,5	25
L-80	551,5	655,0	689,4	-	18,5	23
N-80/CRVENO	551,5	758,3	689,4	-	18,5	24
Q-125	861,0	1034	930,0	-	18	-
P-105/BIJELO	723,9	930,7	930,7	-	17	-
P-110	758,5	965,0	861,0	-	15	-

Svojstva pojedinih materijala klasificiranih po granici tečenja se mogu podijeliti u četiri grupe:

1. **Prva grupa:** H, J, K, N čelici imaju nešto nižu tvrdoću. N se još dijeli na N80-Q i N80-1 koji se razlikuju samo u stanju u kojem se isporučuju (N80-Q mora biti kaljen i popušten, a N80-1 normaliziran ili vruće valjan). H-40 se ne koristi često jer ima relativno nisku granicu razvlačenja, a nije znatno jeftiniji od J-55. J-55 je najčešće korišten tip čelika, preporuča se normalizacijsko žarenje ili vruće valjanje zbog korozivnog djelovanja CO₂ i kisele okoline, ima dobru tvrdoću nakon obrade i mehanička svojstva, koristi se u plićim bušotinama i u onima s nižim tlakom, nije skup. N-80 je materijal koji je podložen djelovanju H₂S, preporuča se kaljenje i žarenje za najbolja svojstva, koristi se u plinskim bušotinama, ima visoku čvrstoću, žilavost i tvrdoću. K-55 se ne razlikuje se po sastavu od J-55, ali ima bolju vlačnu čvrstoću i otpornost na umor i lom. [19]

2. **Druga grupa:** L, C, T imaju ograničeni granicu razvlačenja, ali imaju dobru otpornost na koroziju i djelovanje sumpora. L čelik se dijeli na tri vrste, L80-13Cr, L80-9Cr i L80-1 koji se razlikuju po udjelu kroma i otpornosti na koroziju, a zbog visoke cijene koriste se samo u jako korozivnim medijima. L-80 koristi se u bušotinama kisele atmosfere (H₂S), najčešće se upotrebljava materijal sa 13%Cr. C-95 ima visok udio ugljika, dobru otpornost na trošenje i čvrstoću. [19]
3. **Treća grupa:** P čelik visoke čvrstoće koji se koristi u dubokim bušotinama pod visokim tlakom. P-105 se više se koristi, normalizacijski žaren, zamijenio ga je P-110 s poboljšanim svojstvima. P-110 obrađen je kaljenjem i žarenjem, ima visoku čvrstoću te se koristi u bušotinama gdje je visok tlak, ima dobru postojanost na povišenim temperaturama inače je podložan napetosnom pucanju, ima dobru vlačnu čvrstoću i mehanička svojstva te je također otporan na abraziju. [19]
4. **Četvrta grupa:** Q čelik još više čvrstoće i sposobnosti da izdrži visoke tlakove, ne koristi se u kiselim okolinama, primjenjuje se u dubokim bušotinama (Q-125). [19]

3.5.3. Nerazorne metode ispitivanja

Nerazorne metode ispitivanja ne spadaju pod skupinu mehaničkih svojstava, no često se primjenjuju u ispitivanju mehaničkih svojstava u svrhu pronalaženja nepravilnosti materijala i karakterizacije materijala bez utjecaja na funkcionalnost samog proizvoda. U ispitivanjima crpnih cijevi koristit će se ultrazvučna metoda kako bi se odredila promjena debljine stijenki cijevi nakon eksploatacije. Ispitivanje ultrazvuk temelji se na propagaciji ultrazvučnog impulsa kroz medij i mjerenja odziva materijala tj. odbijanja implusa na granici materijala različitih akustičkih osobina (nehomogenosti u materijalu). Reflektirana energija se prikazuje u odnosu na vrijeme i može se odrediti dubina na kojoj se reflektira impuls. [20]

4. Eksperimentalna ispitivanja i rasprava

U eksperimentalnom dijelu završnog rada provest će se ispitivanja tvrdoće i statičko-vlačno ispitivanje te nerazorna metoda ispitivanja ultrazvukom i metalografska analiza uzorka s ciljem utvrđivanja promjena u mehaničkim svojstvima i mikrostrukтури cijevi nakon eksploatacije.

Cijevi su izrađene od P-110 čelika, čija su svojstva prema API 5CT prikazana u tablici 4, a kemijski sastav u tablici 5. Uvjeti rada eksploatirane cijevi su temperatura 50-100 °C, tlak 50-150 bara i dubina 700-2200 m. Sva ispitivanja su provedena u laboratorijima na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

Tablica 4. Svojstva cijevi izrađenih od čelika P-110 prema API 5CT

OZNAKA	VAJNSKI PROMJER [mm]	DEBLJINA STJENKE [mm]		KONV. GRANICA RAZVLAČENJA [N/mm ²]		VLAČNA ČVRSTOĆA [N/mm ²]	TVRDOĆA [HRC]	ISTEZLJIVOST [%] na 50.8 mm
		minimum	maksimum	minimum	maksimum	minimum		
P-110	73.03 +/- 0,05	5,51	7,82	758,50	965,00	861,00	-	15,00

Tablica 5. Kemijski sastav čelika P-110 prema API 5CT

OZNAKA	C%	Si%	Mn%	P%	S%	Cr%	Ni%	Cu%	Mo%	V%	Fe
P-110	0,26- 0,35	0,17- 0,37	0,40- 0,70	0,02	0,01	0,80- 1,10	0,20	0,20	0,15- 0,25	0,08	ostatak

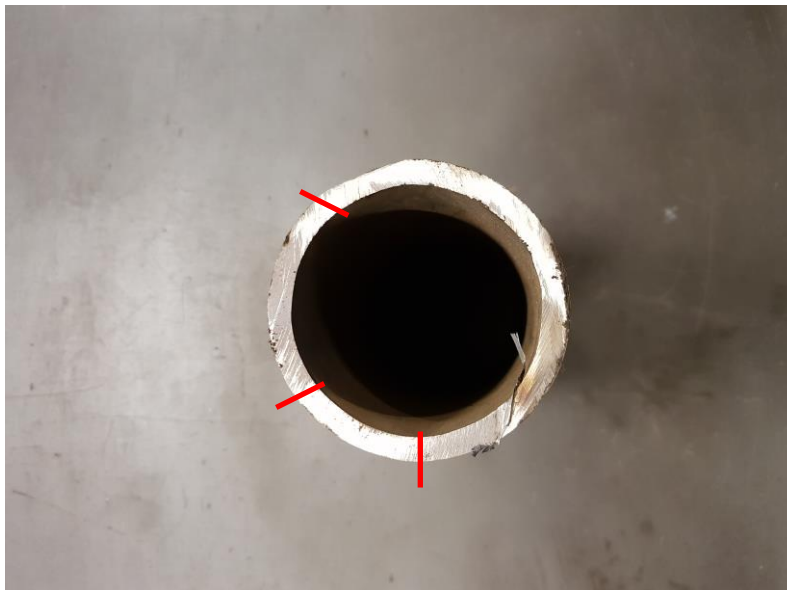
Izmjerena je tvrdoća na Rockwell tvrdomjeru kako bi se utvrdila početna vrijednost s obzirom da prema normi API 5CT za čelik P-110 nije zadana tražena tvrdoća već se ona zadaje i mjeri na zahtjev kupca. Cijevi su očišćene od nečistoća kako bi se na njima moglo provesti ispitivanje mjerenja debljine stijenke ultrazvukom. Uslijedila je izrada epruveta za statičko-vlačno ispitivanje, a nakon statičko-vlačnog ispitivanja, uzorci su pripremljeni za analiza mikrostrukture pod svjetlosnim mikroskopom.

Ispitivanja su provedena na jednoj novoj cijevi i jednoj cijevi koja je bila u eksploataciji godinu dana. Na slici 8. prikazane su ispitivane cijevi i njihov vanjski izgled koji se vidno razlikuje.



Slika 8. Nova i stara crpna cijev

Na slikama 9. i 10. prikazana su označena mjesta mjerenja debljine stijenke crpnih cijevi.



Slika 9. Prikaz stijenke i oblika nove cijevi



Slika 10. Prikaz stijenke i oblika stare cijevi

4.1. Mjerenje tvrdoće

Tvrdoća je ispitana na Rockwell tvrdomjeru proizvođača VEB Werkstoffprüfmaschinen. Mjerna nesigurnost tvrdomjera je $\pm 1,5$ HRC. Izmjereno je 5 vrijednosti tvrdoće za svaku cijev, prikazane u tablici 6.

Tablica 6. Vrijednosti tvrdoće izmjerene na cijevima

	Nova cijev	Stara cijev
Tvrdoća [HRC]	26,5	28,5
	25,0	26,0
	28,0	27,0
	27,0	28,0
	27,5	27,0
Aritmetička sredina	26,8	27,3

Iz tablice možemo očitati da je vrijednost tvrdoće između dviju cijevi skoro jednaka te da se tvrdoća za kratko vrijeme eksploatacije nije smanjila. Na slikama 11. i 12. je postupak mjerenja tvrdoće Rockwell metodom.



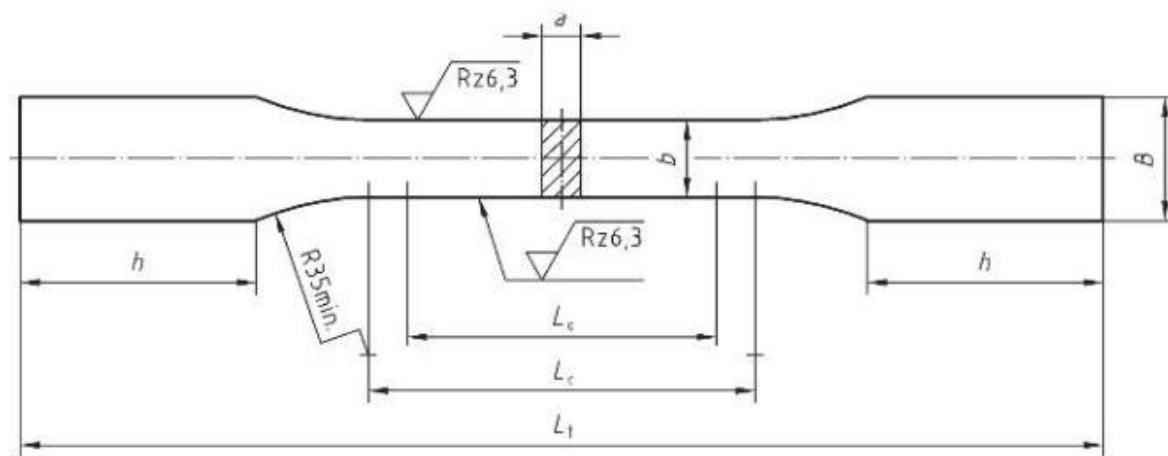
Slika 11. Mjerenje tvrdoće na novoj cijevi



Slika 12. Mjerenje tvrdoće na staroj cijevi

4.2. Statičko vlačno ispitivanje

Statično vlačno ispitivanje provedeno je na kidalici klase 1, proizvođača VEB Werkstoffprüfmaschinen GmbH, raspona 0 – 400 kN, sukladno normi HRN EN ISO 6892-1:2016. Brzina ispitivanja bila je $10 \text{ N/mm}^2 / \text{s}$, a temperatura u prostoriji za vrijeme ispitivanja $24 \pm 0,5^\circ \text{C}$. Za mjerenje produljenja korišten je elektronski ekstenzimetar (opseg 2 mm). Izrađeno je šest plosnatih epruveta, po tri od svake cijevi. Na slici 13. prikazan je izbor dimenzija za izradu epruvete.



Slika 13. Dimenzije plosnate epruvete za statičko vlačno ispitivanje [16]

Oznake na slici znače:

L_0 - početna mjerna duljina epruvete, mm

h – duljina "glave" epruvete, mm

L_t – ukupna duljina epruvete, mm

a – debljina plosnate epruvete, mm

b - širina plosnate epruvete, mm

B - širina glave plosnate epruvete, mm

S_0 – ploština (površina) početnog presjeka epruvete, mm^2

Dimenzije epruveta za provedeno ispitivanje su dane u tablicama 7. i 8., a ispitivane epruvete su prikazane na slici 14.

Tablica 7. Dimenzije epruveta izrađenih od nove cijevi

Dimenzije	N1	N2	N3
a_0 [mm]	4,05	4,09	4,06
b_0 [mm]	10,13	10,08	10,09
S_0 [mm ²]	41,03	41,23	40,97
L_0 [mm]	35,00	35,00	35,00

Tablica 8. Dimenzije epruveta izrađenih od stare cijevi

Dimenzije	a	b	c
a_0 [mm]	4,08	4,06	4,09
b_0 [mm]	10,10	10,14	10,11
S_0 [mm ²]	41,21	41,17	40,35
L_0 [mm]	35,00	35,00	35,00



a)



b)

Slika 14. Ispitne epruvete

a) uzorci nove cijevi (N1, N2, N3)

b) uzorci stare cijevi (a, b, c)

Na slici 15. prikazan je prihvata ispitne epruvete pri statičkom vlačnom ispitivanju. Na epruvetu je također pričvršćen ekstenzimetar koji mjeri produljenje epruvete, a u tablici 9. vrijednosti dobivene statičko vlačnim ispitivanjem za svih 6 epruveta.

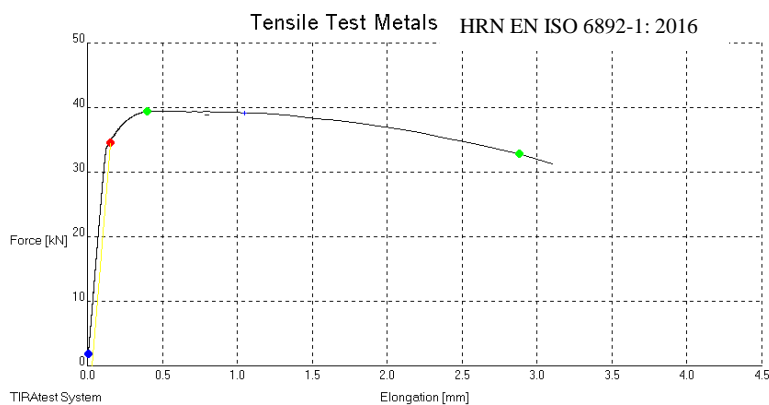


Slika 15. Prihvata ispitnog uzorka pri statičkom vlačnom ispitivanju

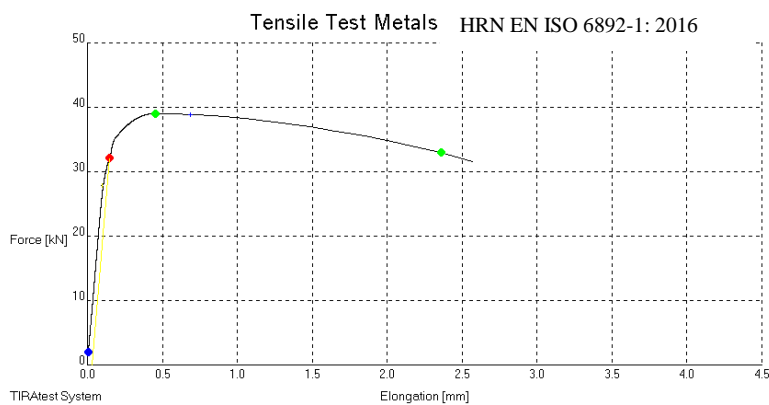
Tablica 9. Vrijednosti dobivene statičkim vlačnim ispitivanjem za obje cijevi

Epruvete	F_m [kN]	F_k [kN]	R_m [N/mm ²]	R_k [N/mm ²]	$R_{p0.2}$ [N/mm ²]	A [%]	Z [%]
N1	38,95	33,42	949,40	814,60	813,20	16,57	44,60
N2	39,05	32,95	947,20	799,20	778,50	14,00	42,66
N3	39,38	32,82	961,30	801,20	844,80	15,86	41,32
Aritmetička sredina	-	-	952,60	805,00	812,20	15,48	42,86
a	39,63	33,99	961,70	824,80	850,70	16,00	47,41
b	39,37	32,32	956,30	785,10	843,10	15,14	45,54
c	39,29	33,28	950,20	804,80	819,90	15,94	42,32
Aritmetička sredina	-	-	956,10	804,90	837,90	15,70	45,09

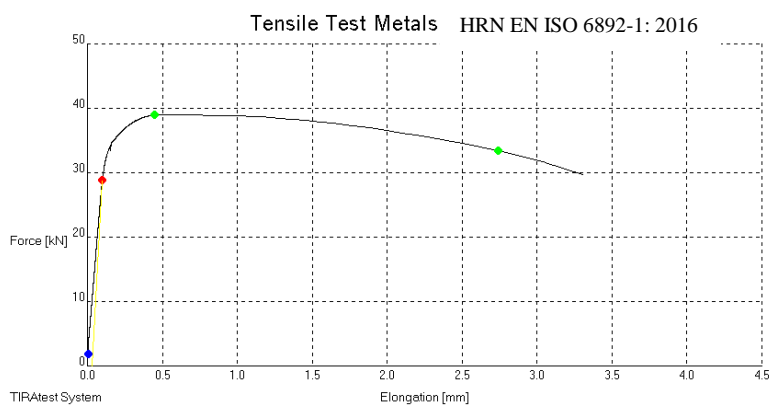
Na slici 16. prikazani su σ - ϵ dijagrami statičkog vlačnog ispitivanja ispitnih epruveta N1, N2 i N3 izrađenih od nove cijevi, a na slici 17. ispitnih epruveta a, b, i c izrađenih od stare cijevi.



N1

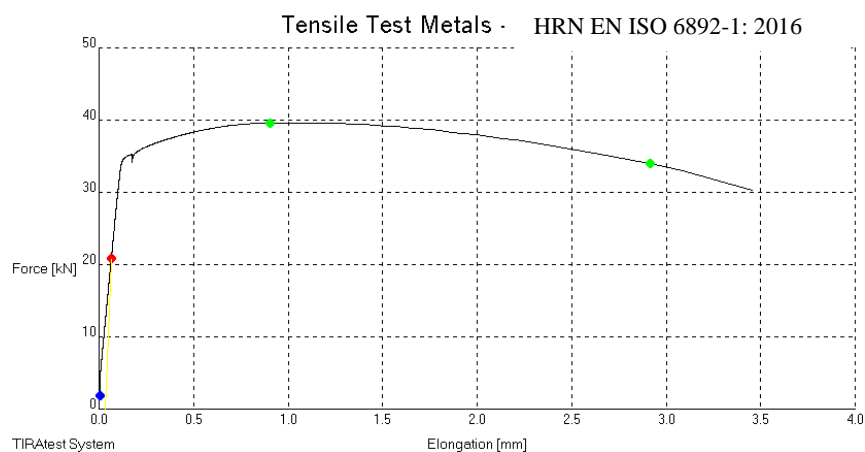
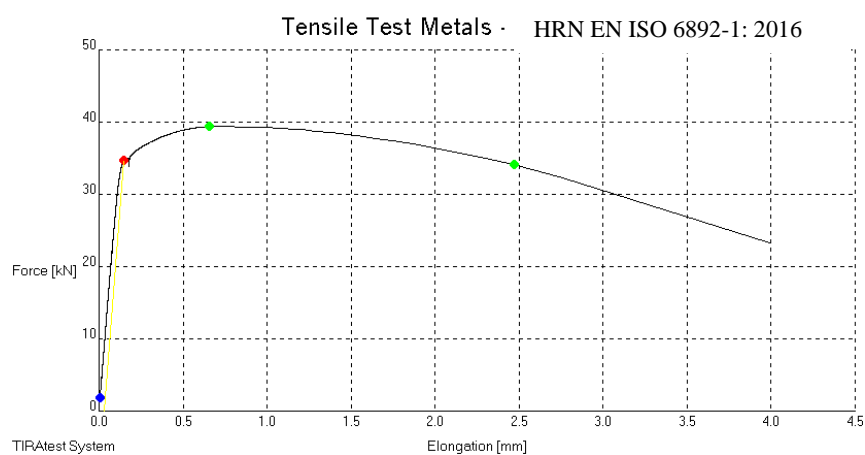
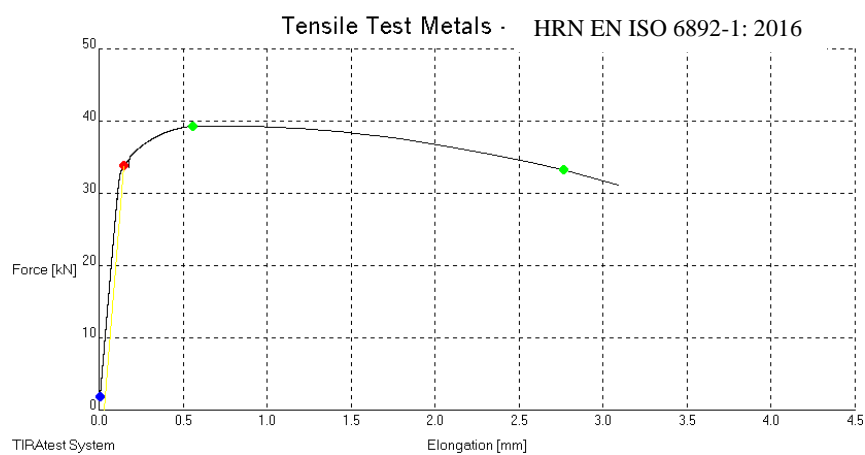


N2



N3

Slika 16. σ - ϵ dijagrami za epruvete N1, N2, N3

**a****b****c****Slika 17. σ - ϵ dijagrami za epruvete a, b, c**

4.3. Nerazorna metoda ispitivanja ultrazvukom

Promjena debljine stijenke nakon eksploatacije ispitivana je ultrazvučnom metodom na uređaju DMS 2 General Electrics, sonda TC560. Na sondu je nanešen lubrikant i izmjerena su 20 mjerenja po pravocrtnoj liniji na staroj cijevi. Na slici 18. prikazana su označena mjesta za ispitivanje, a na slici 19. postupak mjerenja debljine stijenke ultrazvukom i očitavanja. Na novoj cijevi izmjereno je 6 vrijednosti za usporedbu, a rezultati su prikazani u tablicama 10. i 11.



Slika 18. Označavanje mjesta za ispitivanje na cijevima



a)



b)

Slika 19. Postupak mjerenja debljine stijenke ultrazvukom**a) mjerenje debljine stijenke ultrazvukom****b) vrijednost očitana na uređaju****Tablica 10. Debljina stijenke nove cijevi [mm]**

Debljina stijenke nove cijevi [mm]						Aritmetička sredina
5,77	5,71	5,72	5,75	5,71	5,72	5,73

Tablica 11. Debljina stijenke stare cijevi [mm]

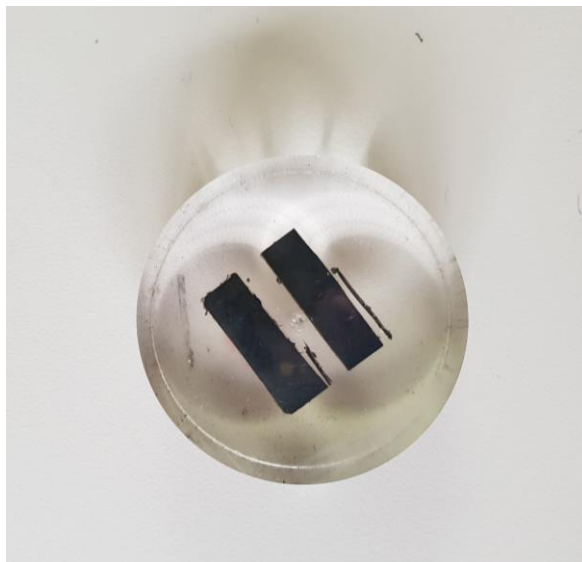
Debljina stijenke stare cijevi [mm]				Aritmetička sredina
5,26	5,25	5,30	5,26	5,22
5,16	5,20	5,19	5,22	
5,12	5,20	5,18	5,17	
5,27	5,23	5,21	5,32	
5,25	5,19	5,12	5,29	

Na novoj cijevi provedeno je manje mjerenja jer je vrlo malo odstupanje u debljini stijenke.

Uočeno je stanjenje stijenke za 0,51 mm nakon eksploatacije crpne cijevi, godinu dana u bušotini koje je moglo nastati zbog samog djelovanja korozije, erozijskog ili abrazijskog trošenja, mehaničkog trošenja klipnom šipkom.

4.4. Metalografska analiza

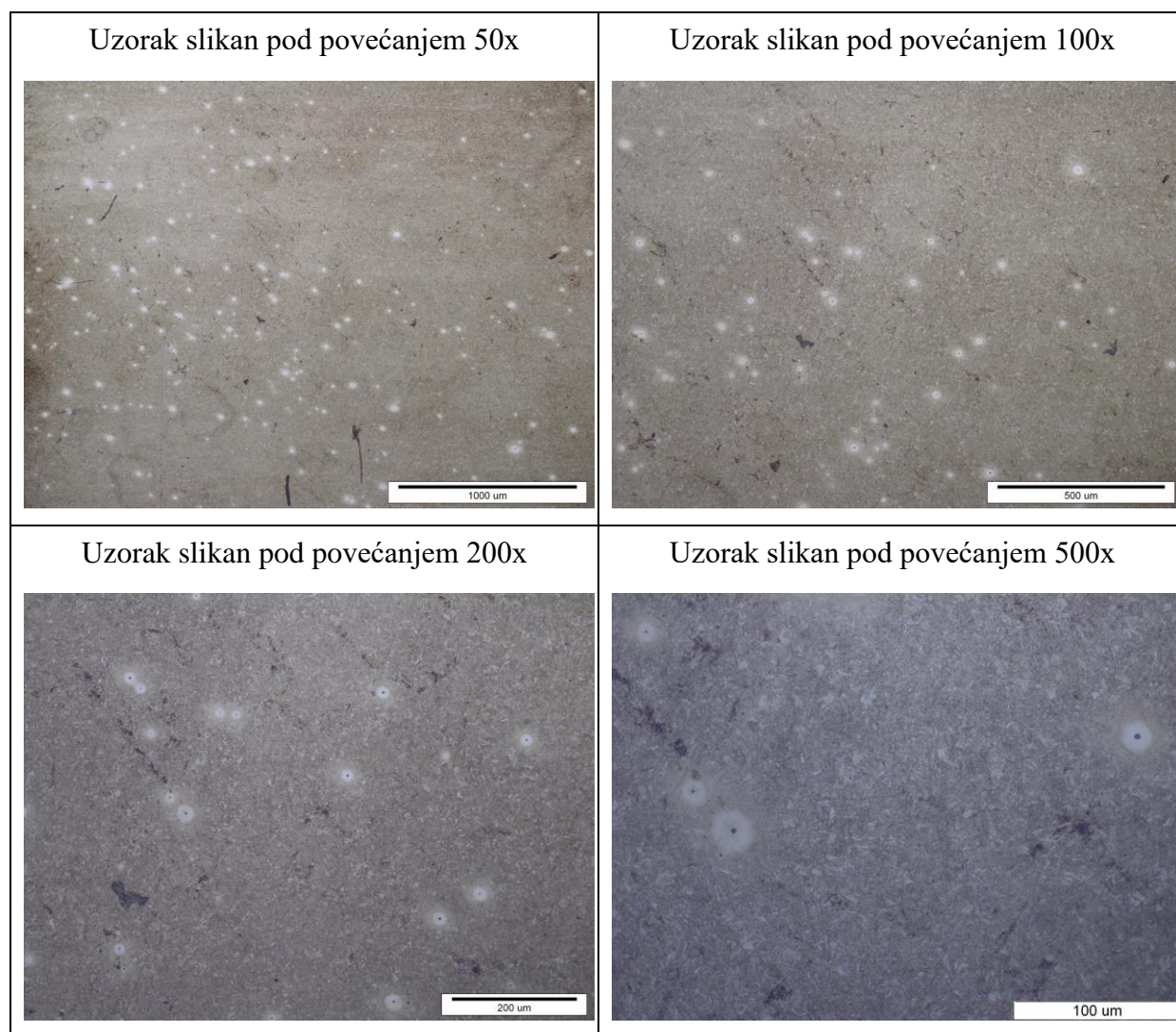
Metalografska analiza je provedena s ciljem pronalaženja nepravilnosti unutar same mikrostrukture materijala. Ispitivanje je provedeno na svjetlosnom mikroskopu Olympus GX51. Uzorci su izrezani te zaliveni u polimernu masu nakon čega su stavljeni u peć na 45 min, na temperaturu 143°C, pod tlakom 2,5 bara. Uzorci su zatim brušeni na brusilici brzinom od 300 okr/min, hlađeni vodom, brusnim papirima P320, P500, P1000, P2400 i P4000. Nakon brušenja, uzorci su polirani na uređaju brzinom vrtnje 150 okr/min, hlađeni lubrikantom, dijamantnom pastom granulacije 3 mikrona te 1 mikron. Kako bi vidjeli mikrostrukturu pod mikroskopom, uzorci su nagriženi u otopini 3% nitala. Na slici 20. prikazani su pripremljeni uzorci za slikanje, zaliveni u polimernu masu.



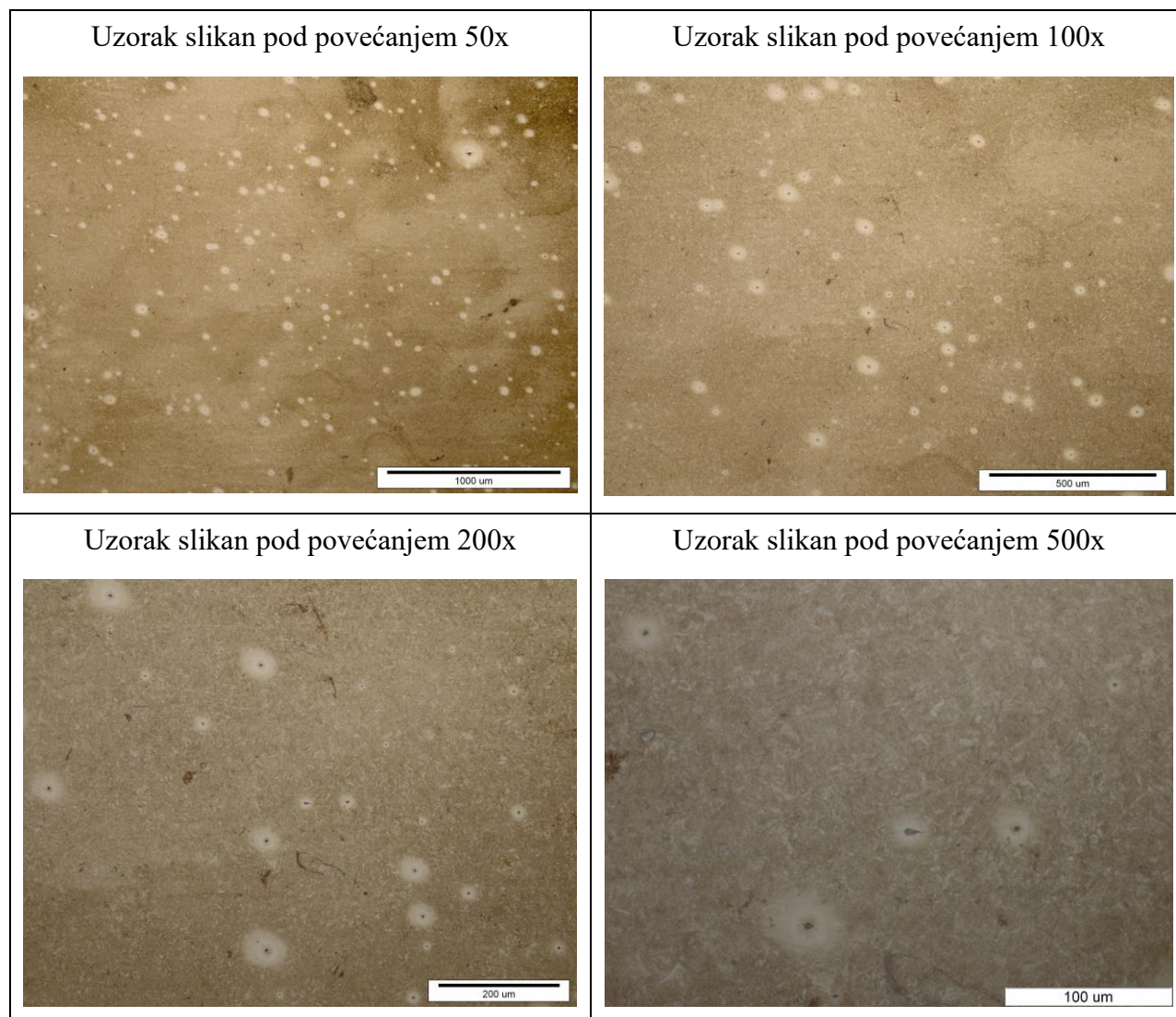
Slika 20. Uzorci zaliveni u polimernu masu

U tablicama 12. i 13. prikazane su mikrostrukture uzoraka, slikane na svjetlosnom mikroskopu Olympus GX51 pod različitim povećanjima. Uzorci su uzeti iz već izrađenih epruveta za statičko vlačno ispitivanje zbog lakše izrade.

Tablica 12. Mikrostruktura uzorka nove cijevi, slikana svjetlosnim mikroskopom pod različitim povećanjima



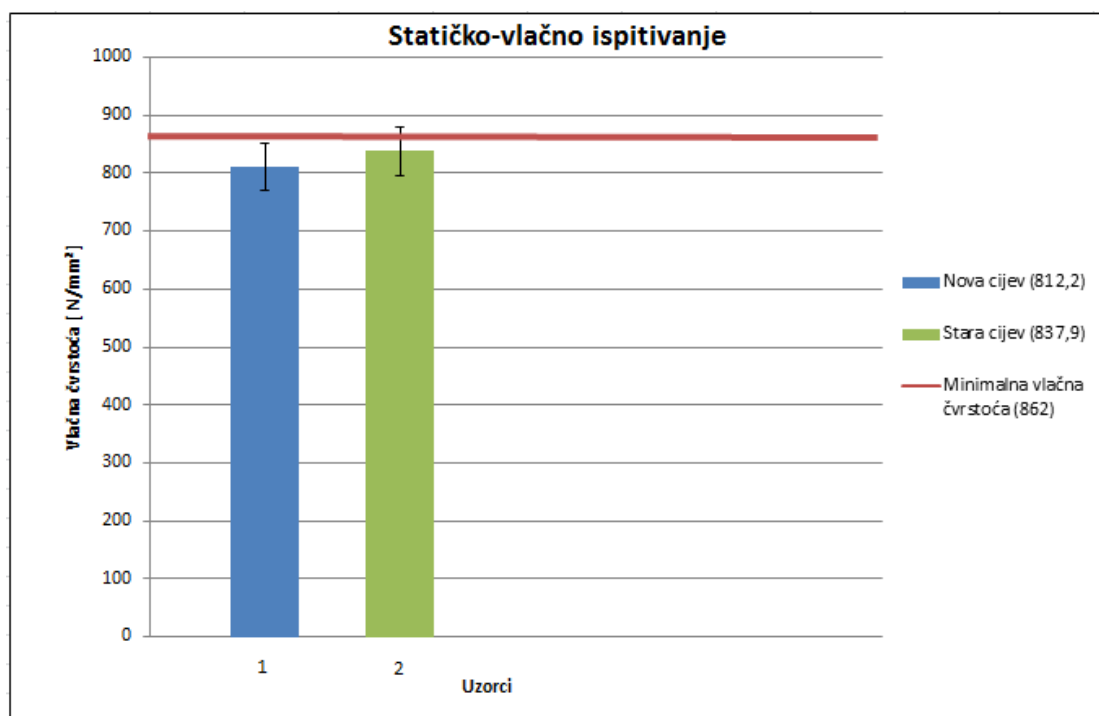
Mikrostruktura na slikama je homogena i nisu uočeni nikakve nečistoće ili nepravilnosti u strukturi.

Tablica 13. Mikrostruktura uzorka stare cijevi, slikana svjetlosnim mikroskopom pod različitim povećanjima

Mikrostruktura na uzorku stare cijevi je također homogena i nepromjenjena, bez nepravilnosti te vizualnom usporedbom identična mikrostrukturi uzorka uzetog iz nove cijevi.

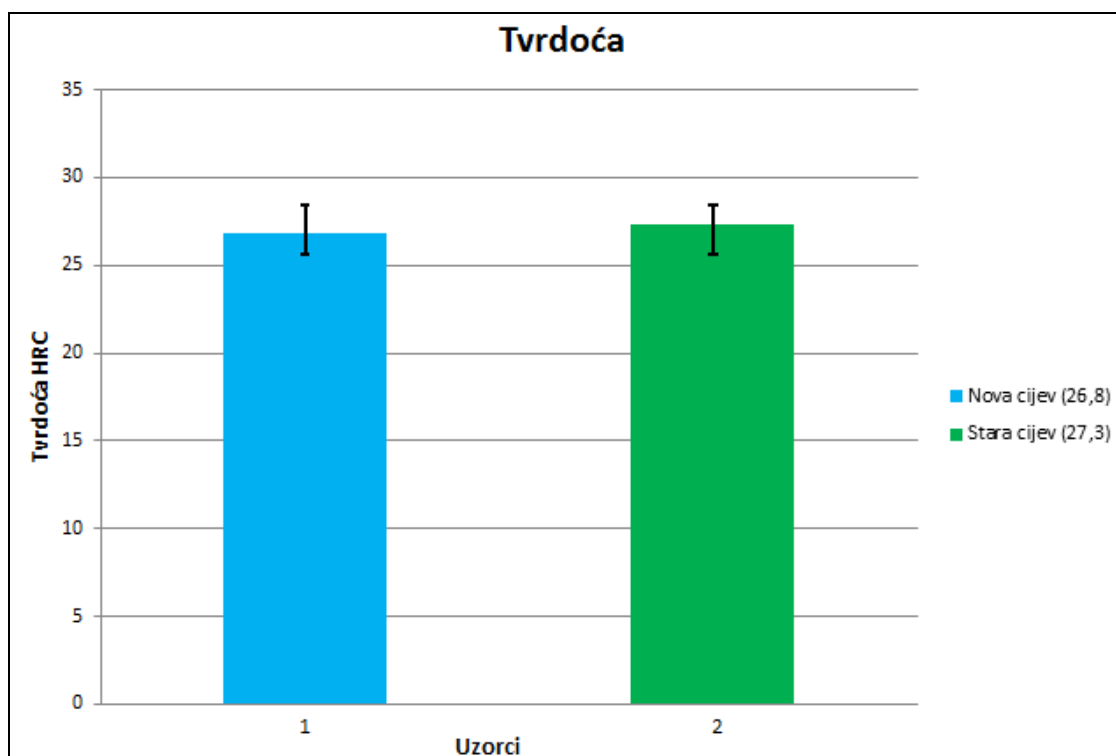
4.5. Rezultati i analiza

Na slici 21. prikazana je usporedba vrijednosti vlačne čvrstoće obje cijevi, izmjerenih statičko-vlačnim ispitivanjem, s vrijednošću minimalne zahtjevane vlačne čvrstoće po API 5CT (862 N/mm^2). Na dijagramu je pokazano da obje vrijednosti vlačne čvrstoće crpnih cijevi ne zadovoljavaju propisanu normu.



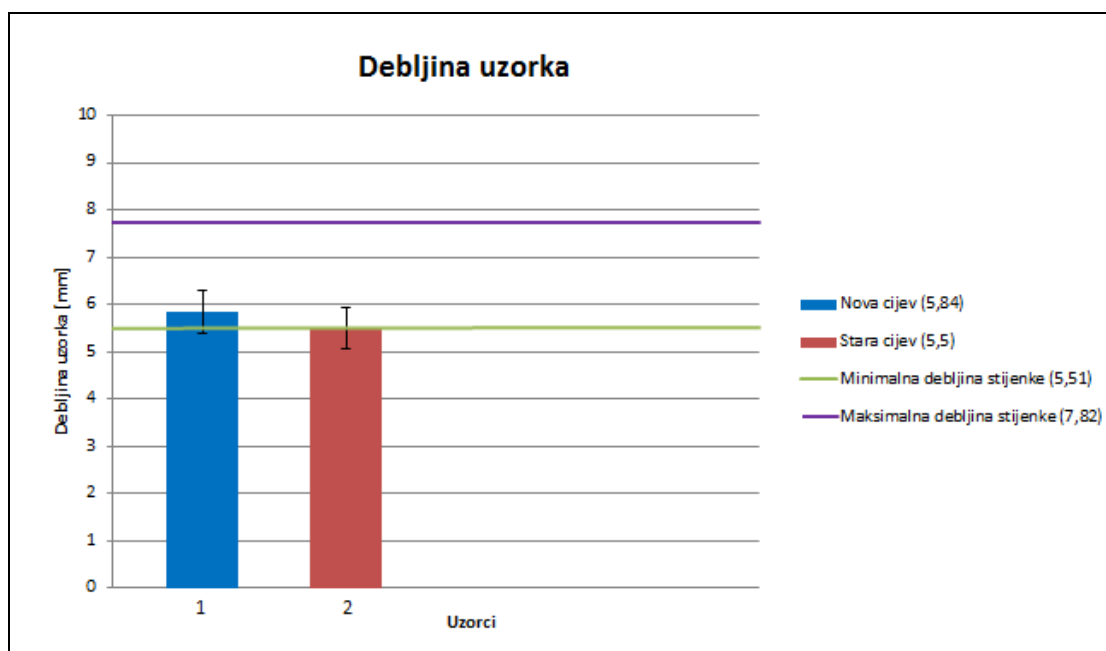
Slika 21. Usporedba dobivenih vrijednosti statičko-vlačnim ispitivanjem

Na slici 22. je usporedba dobivenih vrijednosti tvrdoće, mjerenjem Rockwell metodom. Cijevi izrađene od P-110 čelika nemaju minimalnu zahtjevanu tvrdoću po API 5CT već se ona zadaje na zahtjev kupca.



Slika 22. Usporedba dobivenih vrijednosti mjerenjem tvrdoće

Na slici 23. prikazano je usporedba dobivenih vrijednosti debljine stijenke obje cijevi, mjerenih ultrazvučnom metodom. Izmjerena debljina stijenke nove cijevi (5,73 mm) ulazi u područje dopuštene debljine stijenke cijevi po API 5CT (od 5,51 mm do 7,82 mm), no debljina stijenke crpne cijevi (5,22 mm) nakon eksploatacije ne zadovoljava normu.



Slika 23. Usporedba vrijednosti dobivenih ultrazvučnim mjerenjem debljine stijenke

5. ZAKLJUČAK

Crpne cijevi su jedan od najbitnijih faktora prilikom konstrukcije naftnih bušotina te je njihova zamjena ili popravak vrlo skup proces. Uvjeti rada gotovo uvijek podrazumjevaju korozivni medij, povišenu temperaturu i tlak te konstantno trošenje cijevi, djelovanjem abrazije, erozije ili mehaničko trošenje. Kako bi se maksimizirao radni vijek crpnih cijevi te njihova proizvodnost, velika pažnja se posvećuje odabiru prikladnog materijala za izradu cijevi. Materijal koji će se upotrijebiti mora biti izrazito otporan na određene vrste korozije (napetosna, interkristalna, rupičasta), imati visoku tvrdoću i čvrstoću kako bi izdržao mehaničko trenje te abrazivno i erozivno djelovanje medija koji struji kroz crpne cijevi. Izvrsna mehanička svojstva i povoljna cijena materijala za izradu cijevi doprinose isplativosti bušotine i njenom radnom vijeku sa što manje popravaka.

U eksperimentalnom dijelu rada provedena su ispitivanja tvrdoće, statičko-vlačno ispitivanje, nerazorno ispitivanje ultrazvukom te metalografska analiza optičkim mikroskopom. Ispitivanja su provedena na uzorcima jedne nove cijevi i jedne stare cijevi koja je bila u eksploataciji godinu dana na naftnom polju Žutica.

Ispitivanjem tvrdoće na obje cijevi nije utvrđena znatna razlika u izmjerenim vrijednostima zbog kratkog vremena eksploatacije. Razliku u tvrdoći cijevi možemo objasniti kao mjernu nesigurnosti Rockwell tvrdomjera ($\pm 1,5$ HRC).

Statičkim-vlačnim ispitivanjem izmjerene su vrijednosti neznatne razlike s obzirom na normiranu vrijednost za taj čelik.

Ultrazvučnim ispitivanjem utvrđeno je stanjenje stijenke eksloatirane cijevi za 0,51 mm koje je nastalo zbog kombinacije mehaničkog trošenja stijenke cijevi klipnom šipkom, abrazivnog i erozivnog djelovanja fluida unutar crpne cijevi te korozivnog djelovanja koje s vremenom stanjuje stijenku. Prema trenutnom stanjenju stijenke u godinu dana, možemo zaključiti da bi došlo potpunog potrošenja stijenke nakon desetak godina.

Provedena je i metalografska analiza kako bi se utvrdilo postoje li nekakvi nemetalni uključci ili promjene u mikrostrukturi, no mikrostruktura oba uzroka je vrlo slična i homogena.

Prema dobivenim rezultatima možemo zaključiti da nije došlo do značajnog pada mehaničkih svojstava nakon eksploatacije, što je bilo i očekivano s obzirom da je cijev bila u eksploataciji samo godinu dana, a crpne cijevi se koriste znatno duže. No, primjećena je razlika u debljini stijenke cijevi te, vizualno, i utjecaj korozivnog djelovanja okolnog medija te su zbog toga korozija i trošenje najveća prijetnja dotrajanju crpnih cijevi. Odabir legura zadovoljavajućih mehaničkih svojstava i otpornosti dotrajanju zbog trošenja i korozije može znatno produljiti vijek trajanja crpnih cijevi pa tako i proizvodnost i radni vijek bušotine.

LITERATURA

- [1] Bušenje na veliku dubinu, Hrvatska enciklopedija, Leksikografski zavod Miroslav Krleža
- [2] Oil well, Wikimedia Commons
- [3] The will to drill, Uncover Energy
- [4] Davorin Matanović, Berivoje Pašić, Nediljka Gaurina-Međimurec: Nestabilnost kanala bušotine: uzroci i posljedice, Zagreb, 2007
- [5] Davor Kovačević: Analiza rada sustava podizanja dubinskim sisaljka na naftnom polju Žutica, 2011.
- [6] Oil well, Wikipedia
- [7] Nafta, Hrvatska enciklopedija, Leksikografski zavod Miroslav Krleža
- [8] PEH: Tubing Selection, Design, and Installation, PetroWiki
- [9] Corrosion problems in production, PetroWiki
- [10] Tomislav Filetin, Franjo Kovačićek, Janez Indof: Svojstva i primjena materijala, Sveučilište u Zagrebu FSB, 2002.
- [11] Krešimir Grilec, Suzana Jakovljević, Tribologija i inženjerstvo površina, 2018.
- [12] Posebni metalni materijali – prvi dio, dr. sc. Vera Rede, 2018./2019.
- [13] Josip Kranželić: Napetostna korozija zavarenih spojeva visokolegiranih Cr-Ni čelika, diplomski rad, FSB, 2017.
- [14] Davorin Matanović, Bojan Moslavac: Opremanje i održavanje bušotina, Sveučilište u Zagrebu RGNF, 2011
- [15] API Casing Steel Grades Colour Codes, Havton International
- [16] Željko Alar, Danko Ćorić, Odabrana poglavlja iz mehaničkih svojstava materijala, predavanja, 2016/2017
- [17] Elastičnost; Čvrstoća; Žilavost; Hrvatska enciklopedija
- [18] Ivica Kladarić: Materijali 1, Mehanička svojstva materijala: Ispitivanje tvrdoće, SFSB
- [19] API Tubing Grade & Specifications, Engineers Edge
- [20] Damir Markučić, NDE karakterizacija materijala

PRILOZI

I. CD-R disc